

UNIVERSITE SAÂD DAHLEB DE BLIDA

Faculté de Technologie

Département de Génie Civil

Laboratoire de Géomatériaux et Génie Civil

THÈSE DE DOCTORAT

en Génie Civil

CONTRIBUTION À L'ÉTUDE RHÉOLOGIQUE ET
DURABILITÉ DE BÉTON AUTOPLAÇANT : APPORT DES
AJOUTS CIMENTAIRES TERNAIRES ET DES FILLERS
LOCAUX ET INDUSTRIELS

Par

Akram Salah Eddine BELAIDI

Devant le jury composé de

Mr. Mahmoud BENSAIBI	Professeur, Université Saâd Dahleb, Blida	Président
Mr. El-Hadj KADRI	Professeur, Université Cergy Pontoise, France	Examineur
Mr. Mohamed GHRICI	Professeur, Université Hassiba Benbouali, Chlef	Examineur
Mr. Belkacem MENADI	Maître de conférences, Université Saâd Dahleb, Blida	Examineur
Mr. Lakhdar AZZOUZ	Professeur, Université Amar Telidji, Laghouat	Encadreur
Mr. Said KENAI	Professeur, Université Saâd Dahleb, Blida	Co-Encadreur

RÉSUMÉ

Les bétons autoplaçants (BAP) sont connus comme étant des bétons très fluides, homogènes, qui se mettent en place sous le seul effet de la gravité sans la présence de la ségrégation et du ressuage. Pour obtenir ces propriétés, on ajoute de fortes teneurs en ajouts minéraux. En effet, la combinaison de plusieurs matériaux cimentaires ayant des granularités différentes permet également d'améliorer de façon générale la compacité du béton. Les additions minérales telles que le laitier, la pouzzolane ou même les fillers sont disponibles en abondance en Algérie mais malheureusement non exploitées suffisamment comme additions aux mélanges cimentaires.

Plusieurs travaux ont été réalisés sur les performances des BAP à base de laitier, pouzzolane naturelle, le laitier de haute fourneaux et le métakaolin. Cependant, peu des travaux ont été réalisés sur la combinaison de plusieurs additions minérales.

L'objectif de ce travail est d'étudier l'influence des paramètres de formulation sur les propriétés rhéologiques, mécaniques et durabilité d'un béton autoplaçant, à travers la substitution partielle du ciment par la pouzzolane naturelle de Beni-Saf et/ou la poudre de marbre résidu de l'industrie de polissage et de façonnage de marbre.

L'étude menée a montré que la méthode Okamura pouvait être utilisée avec les matériaux locaux avec quelques modifications concernant l'optimisation de la teneur en sable et en superplastifiant. L'étude rhéologique a montré qu'une teneur de pouzzolane inférieure à 15% peut donner un bon béton autoplaçant sans ressuage ni ségrégation. Par Contre, l'utilisation de la poudre de marbre avec la pouzzolane naturelle de 40 à 50% à apporter un effet bénéfique sur l'ouvrabilité des MAP et BAP.

Les résistances mécaniques diminuent avec l'addition de la pouzzolane seule ou en combinaison avec la poudre de marbre (système ternaire). Cependant, le système ternaire dégage la plus faible valeur de la chaleur d'hydratation.

Du point de vue durabilité l'utilisation de 15% de pouzzolane a améliorer la résistance vis-à-vis l'attaque des sulfates de sodium et de magnésium. Dans le système ternaire l'incorporation de la poudre de marbre avec la pouzzolane naturelle a apporter un effet bénéfique sur la résistance aux attaques par les sulfates de sodium. La substitution du ciment par la pouzzolane naturelle seule et en combinaison avec la poudre de marbre a améliorer la résistance aux attaques des acides sulfurique.

ABSTRACT

Self-Compacting Concretes (SCC) are known to be very fluid concretes, homogeneous, that take place by the only mean of gravity. The SCC are characterized by high flowability, especially a reduction in segregation and bleeding. To obtain these properties, a high content of minerals additions is often used. Indeed the combination of several cementitious materials with different granularities can also improve the compactness of concrete. Mineral additives such as slag, pozzolana, or even fillers are available in abundance in Algeria but unfortunately these additions are not enough exploited as additions to cementitious mixtures. Several studies have been realized on the performance of SCC with ground granulated blast-furnace, natural pozzolana and metakaolin. However, little works has been done on the combination of these mineral additions.

The main objective of this work is to study the influence of formulation parameters on rheological, mechanical and durability of SCC, through partial substitution of cement by natural pozzolana of Beni Saf and/or marble powder residue industry shaping and polishing marble.

The study showed that Okamura's method could be used with local materials with some modifications concerning especially the content in sand, superplasticizer and water. The rheological study showed that a content of less than 15% pozzolana can produce a good SCC without bleeding or segregation. However, the use of powder marble with natural pozzolana of 40% to 50% brought to a beneficial effect on the workability of SCM and SCC. The mechanical strength decreased with the addition of pozzolana alone or in combination with marble powder (ternary system). Whereas, the ternary system releases the lowest value of heat of hydration.

From the perspective of durability the use of 15% pozzolan improves strength vis-à-vis the attack by sulphates of sodium and magnesium. For the ternary system the incorporation of marble powder and natural pozzolana provides a beneficial effect on resistance to attack by sodium sulphate. The substitution of cement with natural pozzolana alone and in combination with marble powder enhances the resistance to attack by sulfuric acid.

REMERCIEMENTS

Mes premiers remerciements vont à Monsieur Lakhdar Azzouz, mon Encadreur, qui m'a fait découvrir le thème des bétons autoplaçants, et je lui en suis très reconnaissant. Il a su me motiver et m'accompagner dans ce projet passionnant où il y a beaucoup à faire.

Je tiens à remercier vivement Monsieur Said Kenai, Professeur à l'Université de Blida, mon co-encadreur, pour m'avoir encourager et m'avoir aider dans mes débuts difficiles. Ses qualités, tant humaines que scientifiques furent pour moi d'un apport inestimable. Je lui en suis très reconnaissant.

Je tiens à exprimer ma profonde gratitude et mes remerciements les plus sincères à Monsieur El Hadj Kadri, Professeur à l'Université Cergy Pontoise, pour la confiance qu'il m'a toujours témoignée. J'ai tout particulièrement apprécié ses encouragements et ses conseils, surtout en fin de thèse. Notre collaboration m'a permis de progresser et de me constituer de solides bases pour le futur.

Je voudrais aussi exprimer ma gratitude au président de jury Monsieur Mahmoud Bensaïbi, Professeur à l'Université de Blida et aux membres du jury à Monsieur Belkacem Menadi, Maître de conférence à l'Université de Blida et à Monsieur Mohamed Ghrici, Professeur à l'Université Hassiba Benbouali de Chlef pour l'honneur qu'ils m'ont fait en acceptant de juger ce travail.

Je remercie les responsables du laboratoire de mécanique et matériaux de génie civil L2MGC de l'Université Cergy Pontoise de m'avoir fait confiance en m'accueillant au sein de leur laboratoire. Je remercie également tous les ingénieurs et les techniciens du laboratoire : Annelise Cousture, Lilian Cristofol et Noémie Chaumont, de m'avoir accordé leurs temps précieux pour réaliser mes expériences.

Je tiens à remercier les responsables du laboratoire de géomatériaux et de génie civil LGEOMAT de l'Université Saâd Dahleb de Blida pour leur soutien scientifique.

Ce travail à été effectué essentiellement au sein du laboratoire de recherche de génie civil LRGC de l'Université Ammar telidji de Laghouat, à cette occasion je tiens à remercier le directeur de laboratoire de recherche Pr. Khenfer Mohamed Mouldi pour son aide appréciable.

Je n'oublie pas d'adresser mes vifs remerciements à tous mes collègues et en particulier Mr. Benabed Benchâa, du département de génie civil de l'Université Ammar Telidji qui m'ont aidé de près ou de loin dans l'accomplissement de ce travail. Je n'ose citer des noms de peur d'oublier quelque uns mais je garderai en mémoire leur aide et leur soutien.

Mes vifs remerciements à mes parents, à ma femme et mes enfants Amjed Houssam Eddine, Rym Fatima Zohra, Mohamed El Habib, pour leurs patiences, pour le sacrifice qui m'on accordé tout au long de la préparation de cette thèse et pour m'avoir supportés et soutenus jusqu'à ce jour.

TABLE DES MATIÈRES

Résumé	2
Abstract	3
Remerciements	5
Introduction	20
1 BÉTONS AUTOPLAÇANTS ; FORMULATIONS ET PERFORMANCES	23
1.1 Introduction	23
1.2 Particularités de la composition des BAP	24
1.2.1 Quantité de fines importante	25
1.2.2 Volume de pâte élevé	25
1.2.3 Emploi de superplastifiants	26
1.2.4 Utilisation d'un agent de viscosité (réteneur d'eau)	26
1.2.5 Faible volumes des gravillons	27
1.3 Différents types d'ajouts	28
1.4 Effet synergique	34
1.5 Les bétons autoplaçants	34
1.5.1 Concept du béton auto-compactant	34
1.5.2 Caractérisation des BAP à l'état frais	34
1.5.2.1 Essai J-Ring	35
1.5.2.2 Essai de l'écoulement à l'entonnoir (V-funnel)	35
1.5.2.3 Essai de l'écoulement au tube en U	36
1.5.2.4 Essai de l'écoulement au caisson	36
1.6 Formulation et compositions des BAP	37
1.6.1 Méthodes basées sur l'optimisation des mortiers	39
1.6.2 Méthodes basées sur l'optimisation du volume de pâte	39
1.7 Principe et application des approches	40
1.7.1 Approche japonaise	40
1.8 Méthode Suédoise	43
1.9 Méthode Française (LCPC)	44

1.10	Comportement à l'état durci	45
1.10.1	Résistance à la compression des BAP	45
1.10.2	Résistance à la traction des BAP	46
1.11	Module d'élasticité instantané des BAP	48
1.12	Retrait	49
1.13	Fluage	51
1.14	Durabilité	52
1.14.1	L'attaque sulfatique	53
1.14.1.1	Complexité du phénomène	53
1.14.1.2	Principales techniques expérimentales	55
1.14.2	Perméabilité A L'oxygène	56
1.14.3	Diffusion des ions chlore	57
1.14.4	Carbonatation	58
	Synthèse bibliographique	60
2	CARACTÉRISATIONS DES MATÉRIAUX ET PROCÉDURES EXPÉRIMENTALES	61
2.1	Introduction	61
2.2	Méthodes d'essais	61
2.2.1	Essais sur granulats	61
2.2.1.1	Analyse granulométrique par tamisage	61
2.2.1.2	Caractéristiques physiques des granulats	62
2.2.2	Le ciment	64
2.2.3	Additions	65
2.2.3.1	Pouzzolane naturelle	65
2.2.3.2	Poudre de marbre	65
2.2.4	Superplastifiant	65
2.2.5	L'eau de gâchage	66
2.3	Formulations adoptées	66
2.3.1	Formulation du Mortier	67
2.3.2	Rapport Eau/Liant (E/L)	68
2.3.3	Rapport Sable/Mortier (S/M)	68
2.3.4	Variation du rapport Superplastifiant/Liant (Sp/L)	68
2.3.5	Confection des mortiers	68
2.4	Formulation du BAP de référence	69
2.4.1	Fixation des rapports Sable/Mortier et Eau/Liant	70

2.4.2	Fixation du rapport Superplastifiant/Liant	70
2.4.3	Confection des bétons autoplaçants	70
2.5	Essais relatifs au mortier à l'état frais	71
2.5.1	Essai d'étalement au Mini-Cône	71
2.5.2	Essai à l'entonnoir en V (V-Funnel test)	72
2.6	Essais relatifs au BAP à l'état frais	73
2.6.1	Essai d'étalement (Slump Flow test)	73
2.6.2	Essai à l'entonnoir en V (V-Funnel test)	75
2.6.3	Essai de J-Ring	76
2.6.4	Mobilité en milieu confiné	78
2.6.5	Essai de stabilité au tamis	78
2.7	Essai de la chaleur d'hydratation	80
2.8	Résistance mécanique du BAP	81
2.9	Expansion aux sulfates	82
2.10	Attaques par les acides	82
2.11	Récapitulatif du programme des essais réalisés	83
3	ÉTUDE RHÉOLOGIQUES DES MORTIERS ET BÉTONS AUTOPLAÇANTS	88
3.1	Introduction	88
3.2	Optimisation du rapport Sable/Mortier	88
3.3	Effet des Superplastifiants sur le mortier frais	90
3.3.1	Etalement au mini-cône pour les mortiers	90
3.3.2	Temps d'écoulement à l'entonnoir en V pour mortiers	91
3.4	Mortier autoplaçant à base de pouzzolane naturelle	93
3.5	Mortier autoplaçant binaire à base de la poudre de marbre	94
3.6	Béton autoplaçant binaire	95
3.6.1	Effet de la pouzzolane sur l'ouvrabilité des BAP à l'état frais	95
3.6.2	Etalement des bétons au cône d'Abrams	97
3.6.3	Temps d'écoulement par l'essai d'entonnoir en V (V-Funnel)	98
3.6.4	Capacité de remplissage par l'essai de la Boîte en L	98
3.6.5	Essai J-Ring	99
3.6.6	Stabilité au Tamis	101
3.6.7	Perte d'ouvrabilité	101
3.7	Mortier autoplaçant ternaire pouzzolane, poudre de marbre (PZ+MP)	102
3.7.1	Etalement par mini-cône pour les mortiers ternaire	103

3.7.2	Temps d'écoulement par V-funnel pour les mortiers ternaires	104
3.8	Béton autoplaçant ternaire	105
3.8.1	Étalement au cône d'Abrams	107
3.8.2	Temps d'écoulement par l'essai d'entonnoir en V (V-Funnel)	108
3.8.3	Capacité de remplissage par l'essai de la Boîte en L (L-Box)	109
3.8.4	Essai de J-Ring	110
3.8.5	Stabilité au Tamis	112
	Synthèse de l'étude Rhéologique	113
4	COMPORTEMENT PHYSICO-MÉCANIQUE DES BÉTONS AUTOPLAÇANTS	115
4.1	Introduction	115
4.2	Caractéristiques chimiques des ajouts	115
4.2.1	Analyse chimique de la pouzzolane naturelle	115
4.2.2	Analyse DRX de la pouzzolane naturelle et de la poudre de marbre	115
4.2.3	Morphologie des grains de la pouzzolane naturelle et la poudre de marbre	116
4.3	Effet de pouzzolane naturelle sur la chaleur d'hydratation	118
4.4	Effet de la pouzzolane sur la résistance à la compression des BAP	125
4.5	Effet de la combinaison de la pouzzolane et de la poudre de marbre sur la résistance à la compression des BAP	127
	Synthèse des résultats physico-mécaniques	131
5	DURABILITÉ DES MORTIERS AUTOPLAÇANTS	132
5.1	Introduction	132
5.2	Durabilité vis-à-vis de l'attaque des sulfates	133
5.2.1	Attaque par les sulfates de magnésium ($MgSO_4$)	133
5.2.1.1	Mortiers binaire à base de pouzzolane	133
5.2.1.2	Mortiers ternaire à base de la pouzzolane et de la poudre de marbre	137
5.2.2	Attaque par les sulfates de sodium (Na_2SO_4)	140
5.2.2.1	Mortiers binaire à base de pouzzolane	140
5.2.2.2	Mortiers ternaire à base de la pouzzolane et de la poudre de marbre	143
5.3	Durabilité vis-à-vis à l'attaques des acides	145
5.3.1	Attaque par l'acide sulfurique (H_2SO_4)	145

5.3.1.1	Mortiers binaire à base de pouzzolane	145
5.3.1.2	Mortiers ternaire à base de la pouzzolane et de la poudre de marbre	146
5.3.2	Attaque par l'acide chlorhydrique (Hcl)	148
5.3.2.1	Mortiers binaire à base de pouzzolane	148
5.3.2.2	Mortiers ternaire à base de la pouzzolane et de la poudre de marbre	149
Synthèse de la durabilité des MAP		151
Conclusions Générales		152
Perspectives et recommandations		154
ANNEXES		156
A EXEMPLE DE CALCUL DE COMPOSITION DU MORTIER		156
A.1	Les Données	156
A.2	Calcul d'humidité du sable	156
A.3	Calcul des quantités de chaque constituant	157
A.3.1	Ciment	157
A.3.2	Sable	157
A.3.3	Superplastifiant	157
A.3.4	Eau	157
!		
B RÉSULTATS DES ESSAIS DE LA CHALEUR D'HYDRATATION POUR MORTIER		159
B.1	Calcul de la chaleur d'hydratation	159
B.2	Calcul de la chaleur accumulée dans le calorimètre	159
B.3	Calcul de la chaleur dissipée vers le milieu ambiant	160
B.4	Calcul de la chaleur d'hydratation	161
B.5	Flux de chaleur	161
C EXEMPLE DE CALCUL DE COMPOSITION DU BÉTON		166
C.1	Les Données	166
C.2	Calcul d'humidité	166
C.3	Calcul des différents composants	166

D PUBLICATION INTERNATIONALE	170
D.1 Publication internationale	170
E NOMENCLATURE	178
RÉFÉRENCES	180

LISTE DES FIGURES

1.1	Phénomène de blocage des granulats au droit d'un obstacle	23
1.2	Compositions et aspects à l'état frais d'un béton ordinaire BO et d'un BAP.	24
1.3	Influence de la finesse du filler sur le comportement rhéologique du béton .	25
1.4	Optimisation du dosage de l'agent de viscosité et super-plastifiant	26
1.5	Comparaison entre une composition de BAP et celle d'un béton vibré	27
1.6	Étalement par cône d'Abrams des BAP en fonction de la teneur en laitier .	29
1.7	monogramme de conception de béton autoplaçant à base de la poudre de marbre	30
1.8	Evolution de la résistance à la compression relative (f_{cj}/f_{c28}) des bétons pouzzolaniques en fonction de l'âge	32
1.9	Résistance à la compression en fonction de la surface spécifique Blaine de la pouzzolane de Béni-Saf	33
1.10	Effet de la substitution du ciment par des ajouts minéraux sur le besoin en eau des mortiers	33
1.11	Schématisation de l'essai du tube en U	36
1.12	Schématisation de l'essai du caisson	37
1.13	Notion d'excès de pâte : (1) la pâte remplit la porosité (2) elle écarte les granulats	40
1.14	Réduction du volume de gravillon à la moitié de sa compacité	41
1.15	Recherche du dosage en eau et en superplastifiant : écoulement relatif T en fonction de l'étalement relatif D. La flèche indique le sens des rapports massiques eau sur fines E/F croissants. Le couple optimal est indiqué par un cercle	42
1.16	Phénomène de blocage des granulats au droit d'un obstacle	43
1.17	Evolution de la résistance à la compression d'un BAP et d'un BV (REF) .	46
1.18	Comparaison des modules élastiques théoriques de BAP et de bétons vibrés avec leurs valeurs expérimentales	49
1.19	Evolution du retrait (Influence de la nature du béton)	50
1.20	Déformations sous charge unitaire pour des bétons de résistance supérieure à 40 MPa	51

1.21	Fluage total. (Influence de nature du béton)	52
1.22	Schéma simplifié des processus de détérioration du béton intervenant lors des attaques sulfatiques (DEP : Détérioration en Eau Pure, ASSO : Attaque au Sulfate de Sodium Na_2SO_4)	54
1.23	Perméabilité à l'état sec des bétons d'ouvrage	56
1.24	Comparaison des coefficients de diffusion des ions chlore entre BAP et bétons vibrés	58
1.25	Diagramme des équilibres thermodynamiques à 20 °C des phases hydratées du ciment avec le CO_2	59
2.1	Analyse granulométrique	62
2.2	Séquence de malaxage lors de l'élaboration du mortier	69
2.3	Séquence de malaxage du béton autoplaçant	71
2.4	Essai d'étalement pour mortier	72
2.5	Essai à l'entonnoir en V pour mortier	72
2.6	Mesure du diamètre d'étalement	73
2.7	Dispositif de l'essai d'entonnoir en V (V-Funnel)	75
2.8	Dimensions du J-ring et positions pour mesure de différence des hauteurs	76
2.9	Mesure d'étalement en présence du J-Ring	77
2.10	Mesure des hauteurs à l'intérieur et à l'extérieur du J-Ring	77
2.11	Essai de la boîte en L (L-box test)	78
2.12	Schéma d'essai de stabilité au tamis	79
2.13	Mesure de la laitance du BAP par l'essai de stabilité au tamis	79
2.14	Dispositif expérimental pour la mesure de la Chaleur d'Hydratation	81
2.15	Machine d'écrasement pour l'essai de la résistance au compression	82
2.16	Diagramme des essais réalisés sur mortier de référence	84
2.17	Diagrammes des essais réalisés sur mortier avec ajouts	85
2.18	Diagramme des essais réalisés sur le béton à l'état frais	86
2.19	Diagramme des essais réalisés sur le béton à l'état durci	87
3.1	Examen visuel de la galette de mortier autoplaçant	89
3.2	Variation de l'étalement par mini-cône en fonction de teneur en superplastifiant	91
3.3	Variation de temps d'écoulement par V-funnel en fonction du dosage en superplastifiant	92
3.4	Variation de l'étalement et temps d'écoulements en fonction de teneur en superplastifiant	92

3.5	Etalement et temps d'écoulement du mortier en fonction de la teneur en pouzzolane naturelle	94
3.6	Etalement et temps d'écoulement du mortier en fonction de la teneur en poudre de marbre	95
3.7	Etalement des bétons autoplaçant à base de la pouzzolane naturelle	97
3.8	Temps d'écoulement à l'entonnoir en V des bétons binaire	98
3.9	Capacité de remplissage par L-Box pour les bétons à base de pouzzolane	99
3.10	Différence d hauteurs B_j pour les bétons binaire	100
3.11	Etalement avec J-Ring pour les bétons à base de pouzzolane naturelle	100
3.12	Laitance bétons à base de pouzzolane naturelle	101
3.13	Perte d'ouvrabilité en fonction du temps	102
3.14	Etalement par mini-cône du mortier ternaire	104
3.15	Temps d'écoulement par mini V-funnel du mortier ternaire	105
3.16	Etalement des bétons ternaire	108
3.17	Temps d'écoulement à l'entonnoir en V des bétons ternaires	109
3.18	Capacité de remplissage des bétons ternaire par la boîte en L	110
3.19	Etalement avec J-Ring pour les bétons ternaire	111
3.20	Différence d hauteurs (J-Ring) pour les bétons ternaire	111
3.21	Stabilité à tamis pour les bétons ternaires	112
4.1	Spectres de diffraction aux rayons X de la pouzzolane naturelle	116
4.2	Spectres de diffraction aux rayons X de la poudre de marbre	116
4.3	Microscope électronique à balayage	117
4.4	Analyse de la pouzzolane naturelle par microscope électronique à balayage	117
4.5	Analyse de poudre de marbre par microscope électronique à balayage	118
4.6	Variation de la température des mortiers binaires	119
4.7	Variation de la chaleur d'hydratation cumulée des mortiers binaires	120
4.8	Variation de la chaleur d'hydratation cumulée du mortier binaire pour les premiers 18 heures	120
4.9	Variation du flux de chaleur des mortiers binaires	121
4.10	Variation de la température des mortiers ternaires avec 5% de pouzzolane	122
4.11	Variation de la température des mortiers ternaires avec 10% de pouzzolane	122
4.12	Variation de la chaleur d'hydratation cumulée des mortiers ternaires avec 5% de pouzzolane	123
4.13	Variation de la chaleur d'hydratation cumulée des mortiers ternaires avec 10% de pouzzolane	123

4.14	Variation de la chaleur d'hydratation cumulée du mortier ternaire pour les premiers 18 heures	124
4.15	Variation du flux de chaleur des mortiers ternaires avec 5% de pouzzolane .	124
4.16	Variation du flux de chaleur des mortiers ternaires avec 10% de pouzzolane	125
4.17	Variation de la résistance à la compression aux différents âges	126
4.18	Taux d'évolution de la résistance après 28 jours	127
4.19	Résistance au compression pour les BAP ternaire (PZ/MP=1)	129
4.20	Résistance au compression pour les BAP ternaire (PZ/MP=1/3)	130
5.1	Expansion des mortiers binaires immergés dans 5% de $MgSO_4$	133
5.2	Observations au MEB d'échantillons de mortier autoplaçant avec 0%PZ exposé à l'immersion dans une solution de 5% de $MgSO_4$ pendant 8 mois ; (a) Fracture (x2500/15kv)-(b) Fracture (x1600/15kv)	135
5.3	Observations au MEB d'échantillons de mortier autoplaçant avec 10%PZ exposé à l'immersion dans une solution de 5% de $MgSO_4$ pendant 8 mois ; (a) Fracture (x2500/15kv)-(b) Fracture (x1600/15kv)	135
5.4	Observations au MEB d'échantillons de mortier autoplaçant avec 15%PZ exposé à l'immersion dans une solution de 5% de $MgSO_4$ pendant 8 mois ; (a) Fracture (x5000/15kv)-(b) Fracture (x2500/15kv)	135
5.5	Perte en masse des mortiers binaires dans 5% de $MgSO_4$	136
5.6	Examen visuel des éprouvettes pour : (a) Mortier binaire; (b) Mortier ternaire exposé à 5% de $MgSO_4$ après 8 mois	137
5.7	Expansion des mortiers ternaires immergés dans 5% de $MgSO_4$	137
5.8	Observations au MEB d'échantillons de mortier autoplaçant avec 5%PZ+5%MP exposé à l'immersion dans une solution de 5% de $MgSO_4$ pendant 8 mois ; (a) Fracture (x2500/15kv)-(b) Fracture (x1600/15kv)	138
5.9	Observations au MEB d'échantillons de mortier autoplaçant avec 10%PZ+10%MP exposé à l'immersion dans une solution de 5% de $MgSO_4$ pendant 8 mois ; (a) Fracture (x2500/15kv)-(b) Fracture (x1600/15kv)	139
5.10	Perte en masse des mortiers ternaires dans 5% de $MgSO_4$	139
5.11	Expansion des mortiers binaires immergés dans 5% de Na_2SO_4	140
5.12	Observations au MEB d'échantillons de mortier autoplaçant avec 15%PZ exposé à l'immersion dans une solution de 5% de Na_2SO_4 pendant 8 mois ; (a) Fracture (x5000/15kv)-(b) Fracture (x2500/15kv)	141
5.13	Perte en masse des mortiers binaires au cours du temps dans 5% de Na_2SO_4	141

5.14 Examen visuel des échantillons exposé à 5% de Na_2SO_4 après 8 mois : (a) Mortier binaire - (b) Mortier ternaire	142
5.15 Examen visuel de mortier ternaire contenant 10%PZ+10%MP exposé à 5% de Na_2SO_4	142
5.16 Expansion des mortiers ternaires immergés dans 5% de Na_2SO_4	143
5.17 Observations au MEB d'échantillons de mortier autoplaçant avec 5%PZ+5%MP exposé à l'immersion dans une solution de 5% de Na_2SO_4 pendant 8 mois ; (a) Fracture (x5000/15kv)-(b) Fracture (x2500/15kv)	144
5.18 Observations au MEB d'échantillons de mortier autoplaçant avec 10%PZ+10%MP exposé à l'immersion dans une solution de 5% de Na_2SO_4 pendant 8 mois ; (a) Fracture (x2500/15kv)-(b) Fracture (x1600/15kv)	144
5.19 Perte en masse des mortiers ternaires immergés dans 5% de Na_2SO_4	144
5.20 Perte en masse des mortiers binaires immergés dans 2.5% de H_2SO_4	145
5.21 Examen visuel des échantillons exposé à 2.5% de H_2SO_4 après 6 mois : (a) Mortier de référence 0%PZ (b) Mortier binaire 15%PZ	146
5.22 Perte en masse des mortiers ternaires immergés dans 2.5% de H_2SO_4	147
5.23 Examen visuel des échantillons exposé à 2.5% de H_2SO_4 après 6 mois : (a) Mortier de référence 0%PZ (b) Mortier ternaire 5%PZ+15%MP	147
5.24 Perte en masse des mortiers binaires immergés dans 1% de Hcl	148
5.25 Examen visuel des échantillons exposé à 1% de Hcl après 6 mois : (a) Mortier de référence 0%PZ (b) Mortier binaire 5%PZ	149
5.26 Perte en masse des mortiers ternaires immergés dans 1% de Hcl	149
5.27 Examen visuel des échantillons exposé à 1% de Hcl après 6 mois : (a) Mortier de référence 0%PZ (b) Mortier ternaire 5%PZ+5%MP	150

LISTE DES TABLEAUX

31table.32

1.2	Principales caractéristiques des bétons testés	45
1.3	Résistance à 28 jours pour des éléments standards	46
1.4	Valeurs des différents retraits à 200 jours	49
2.1	Caractéristiques des granulats	64
2.2	Caractéristiques minéralogiques du ciment	64
2.3	Caractéristiques physiques et chimiques de ciment, pouzzolane naturelle et poudre de marbre	65
2.4	Classes des BAP selon l'étalement et le domaine d'utilisation	74
3.1	Compositions et résultats des essais sur mortiers pour différentes valeurs du rapport Sable/Mortier (S/M).	89
3.2	Résultats à l'état frais des mortiers à base de la pouzzolane naturelle	93
3.3	Résultats à l'état frais des mortiers à base de la poudre marbre	94
3.4	Composition des bétons autoplaçants à base de la pouzzolane naturelle	96
3.5	Résultats des essais à l'état frais pour les BAP à base de pouzzolane	96
3.6	Résultats des essais à l'état frais des mortiers ternaires : PZ/MP=1	103
3.7	Résultats des essais à l'état frais des mortiers ternaires : PZ/MP=1/3	103
3.8	Compositions des bétons ternaire avec un rapport PZ/MP=1	105
3.9	Compositions des bétons ternaire avec un rapport PZ/MP=1/3	106
3.10	Résultats des essais d'ouvrabilité sur bétons ternaire (PZ/MP=1)	106
3.11	Résultats des essais d'ouvrabilité sur bétons ternaire (PZ/MP=1/3)	107
4.1	Caractéristiques chimiques de la pouzzolane naturelle	115
4.2	Résistance à la compression des BAP binaires	126
4.3	Résistances à la compression des BAP ternaires (PZ/MP=1)	129
4.4	Résistances à la compression des BAP ternaires (PZ/MP=1/3)	129
4.5	Taux diminution de la résistance à la compression à «j» jours par rapport à celle de référence à «j» jours pour un rapport PZ/MP=1	130
4.6	Taux diminution de la résistance à la compression à «j» jours par rapport à celle de référence à «j» jours pour un rapport PZ/MP=1/3	130

B.1 Valeurs de température des mélanges de mortier binaires en fonction du
temps 162

B.2 Valeurs de température des mélanges de mortier ternaire en fonction du
temps 164

INTRODUCTION

Généralités

Les bétons autoplaçants (BAP) ont été utilisés pour la première fois au Japon vers la fin des années 80 afin d'améliorer la rentabilité de la construction, d'assurer constamment une mise en place correcte avec un béton de qualité et de diminuer les nuisances sonores [1]. Ces bétons se développent actuellement maintenant en Europe et semblent être amenés à remplacer, à terme, les bétons vibrés classiques dans de nombreuses applications.

Les BAP présentent à la fois des intérêts techniques et économiques tel que l'absence de nuisances sonores en milieu urbain, les possibilités de bétonnage en zones fortement ferraiillées ou à géométrie complexe et l'obtention d'une meilleure qualité de béton. Les aspects d'amélioration du béton se caractérisent d'une part par la réduction des délais (rapidité de mise en place du béton), le gain de productivité, l'économie de main d'œuvre, l'amélioration des conditions de travail et de sécurité et l'augmentation de la durée de vie des coffrages et d'autre part par l'amélioration de la qualité des parements et des aspects de surface sans avoir recours aux vibration, le parfait enrobage des armatures, l'homogénéité et l'esthétique, le bon écoulement et le remplissage des coffrages sans présence de ségrégation.

Diverses études citent que l'addition des fillers, pouzzolaniques ou non pouzzolaniques, au ciment de Portland affecte les propriétés du béton frais et durci.

L'utilisation des additions minérales tels que la fumée de silice (FS), les cendres volantes (CV) et le laitier (L) pourrait réduire le coût de matériaux et augmenter l'auto-compatibilité [2]. L'utilisation de ces additions peut également augmenter la fluidité du béton et réduire la consommation du superplastifiant pour obtenir une ouvrabilité semblable à base avec du ciment seul [3]. En outre, l'incorporation de ces matériaux fins peut augmenter la distribution des gros granulats et permet d'assurer une meilleure cohésion [4].

Park et al [5] ont étudié l'influence de laitier, des cendres volantes et de la fumée de silice sur la rhéologie des pâtes. Les pâtes de ciment utilisées sont conçues avec un seul composant (OPC), deux composants (OPC-L, OPC-CV, et OPC-FS), et trois composants

(OPC-L-FS et OPC-CV-FS). Ils ont constaté que pour les systèmes ternaires les propriétés rhéologiques des pâtes de ciment se sont améliorées par rapport aux systèmes binaires.

Sonebi [3] a signalé que l'incorporation de la cendre pulvérisée de carburant et les fillers calcaires réduit la consommation de superplastifiant (SP) pour obtenir un étalement désiré. Bouzoubaa et Lachemi [6] ont conçu un BAP en incorporant 50% des cendres volantes.

Plusieurs études [7–14] ont prouvé que la pouzzolane naturelle a été employée couramment comme produit de substitution de ciment Portland pour ses propriétés avantageuses qui incluent la réduction du coût, la réduction de l'évolution de la chaleur, la diminution de la perméabilité et l'augmentation de la résistance chimique.

Le marbre a été utilisé généralement comme matériau de construction depuis des époques antiques. La disposition des déchets de l'industrie de marbre est l'un des problèmes majeurs pour les soucis environnementaux partout dans le monde. La poudre de marbre (MP) est un matériau inerte obtenu comme sous-produit industriel pendant le coupage, le façonnage et le polissage du marbre. Alyamaç et al [15] souligne que ces déchets peuvent être utilisés avec succès en tant qu'ajouts inerte en technologie du BAP. La poudre de marbre utilisée en tant qu'addition minérale de ciment améliore quelques propriétés du béton autoplçant à l'état frais et durci [16].

Aruntas et al. [17] ont montré que l'utilisation de 10% de poudre comme ajout de poudre de marbre peut être considérée dans la production du ciment. Dans ce cas la résistance à la compression du mortier à base de poudre de marbre est plus élevée que celle du mortier sans ajouts. De ce fait le coût de production de ciment peut être diminué avec l'utilisation de 10% de poudre de marbre.

Aucune recherche détaillée n'a été faite pour étudier l'effet d'une combinaison de la pouzzolane naturelle et de la poudre de marbre sur les propriétés des mortiers et de bétons autoplçants.

Ce travail présente une recherche expérimentale sur l'effet combiné des deux ajouts utilisés sur les propriétés à l'état frais et à l'état durci du mortier autoplçant (MAP) et du béton autoplçant (BAP).

Objectifs

L'objectif principal de ce travail est l'analyse de l'effet d'addition de la pouzzolane naturelle et de la poudre de marbre sur les paramètres de formulation et sur les performances des bétons autoplacants.

La performance du BAP à l'état frais a été étudiée par les essais rhéologiques : essais l'étalement sans et avec le J-Ring, essais V-funnel, essais L-Box et l'essais de stabilité à tamis.

L'effet de ces ajouts sur la chaleur d'hydratation et les propriétés mécaniques est aussi étudiée. La durabilité a été suivie à travers l'étude de la performance du mortier autoplacant sous l'attaque des sulfates et acides jusqu'à une durée de 6 mois.

Plan de travail

Une introduction générale est donnée dans le début de cette thèse. Dans le premier chapitre on présente une recherche bibliographique sur les différentes propriétés du BAP à l'état frais ; sa formulation, les différents essais utilisés à l'état frais ainsi que le comportement des BAP à l'état durci et leur durabilité. Le deuxième chapitre discute les différentes caractéristiques des matériaux et les procédés expérimentaux spécifique pour les bétons autoplacants, dans ce chapitre on a présenté les différents essais classiques sur les matériaux utilisés comme les granulats et les liants. La méthode de formulation et les différents essais sur le béton autoplacant qu'on a utilisé dans ce travail sera aussi présenté dans ce chapitre.

Le troisième chapitre présente les résultats rhéologiques des mortiers et des bétons autoplacants suivi par des analyses et des interprétations de ces résultats.

Le quatrième chapitre nous présentent le comportement mécaniques des bétons autoplacant à l'état durci, l'effet des ajouts sur la chaleur d'hydratation sera aussi analysé.

Le dernier chapitre regroupe les essais de durabilité et en particulier le comportement des mortiers autoplacant vis-à-vis de l'attaques des sulfates et des acides.

CHAPITRE 1

BÉTONS AUTOPLAÇANTS ; FORMULATIONS ET PERFORMANCES

1.1 Introduction

Un béton autoplaçant (BAP) présente plusieurs spécificités de composition. Un BAP doit s'écouler naturellement sous son poids propre (avec un débit suffisant), et doit aussi pouvoir remplir, sans vibration, des zones confinées et une grande fluidité du béton peut ne pas être suffisante pour cela. Donc, Pour éviter ceci, il est nécessaire qu'un BAP ait une bonne résistance à la ségrégation en phase d'écoulement en zone confinée pour éviter le phénomène de blocage (cf. Figure 1.1).

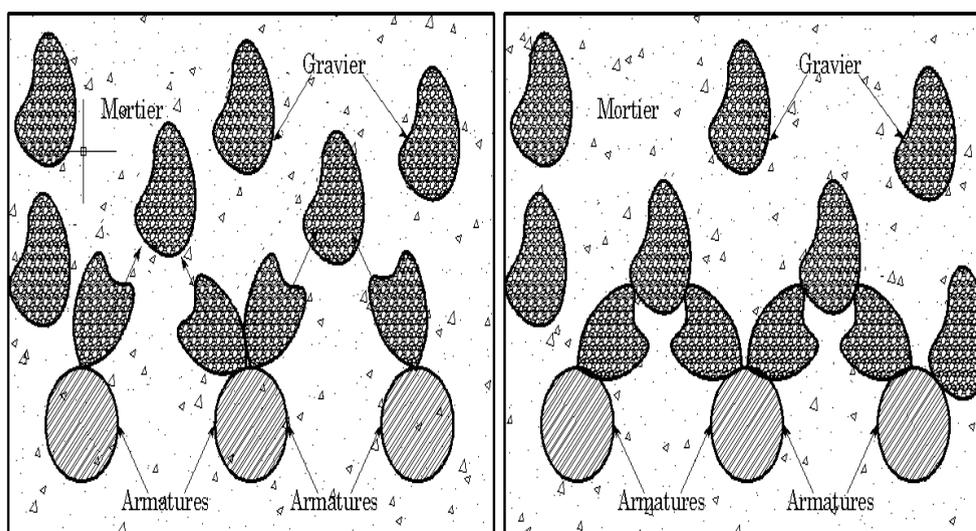


Figure 1.1 – Phénomène de blocage des granulats au droit d'un obstacle [18]

En plus, un BAP doit présenter une bonne résistance à la ségrégation statique jusqu'au durcissement du béton, et un ressuage faible pour éviter une chute d'adhérence des armatures en partie supérieure des levées, par rapport à celles situées en zone inférieure lors du coulage, ainsi que l'apparition des fissures. Par conséquent, le principal problème dans la formulation d'un BAP est de concilier des propriétés, a priori contradictoires comme la fluidité, la résistance à la ségrégation et le ressuage du béton.

1.2 Particularités de la composition des BAP

Par définition, un béton autoplaçant (BAP) est un béton très fluide, homogène et stable, qui se met en place par gravitation et sans vibration. Il ne doit pas subir de ségrégation et doit présenter des qualités comparables à celles d'un béton vibré classique. Le terme de béton autonivelant peut aussi être utilisé mais il concerne plutôt des applications horizontales (dallage par exemple). Ces bétons présentent plusieurs propriétés qui justifient l'intérêt nouveau que leur portent les industriels [19] :

- absence de vibration qui réduit les nuisances sonores,
- bétonnage de zones fortement ferrillées et à géométrie complexe,
- pénibilité du travail moindre,
- réduction du coût de la main d'œuvre, durée de construction plus courte.

En général, les BAP possèdent un même dosage en ciment et en eau que les bétons ordinaires (BO), ainsi qu'un volume de sable assez proche. C'est donc principalement l'ajout d'une addition qui sert de substitut aux gravillons. Les proportions exactes de chaque constituant dépendent de la méthode de formulation choisie. Pour parvenir à ce cahier des charges, les BAP sont formulés différemment des BO. Dans ce cas la pâte, définie comme le mélange du ciment, d'eau et d'une addition, est privilégiée au détriment des gravillons (cf. Figure 1.2).

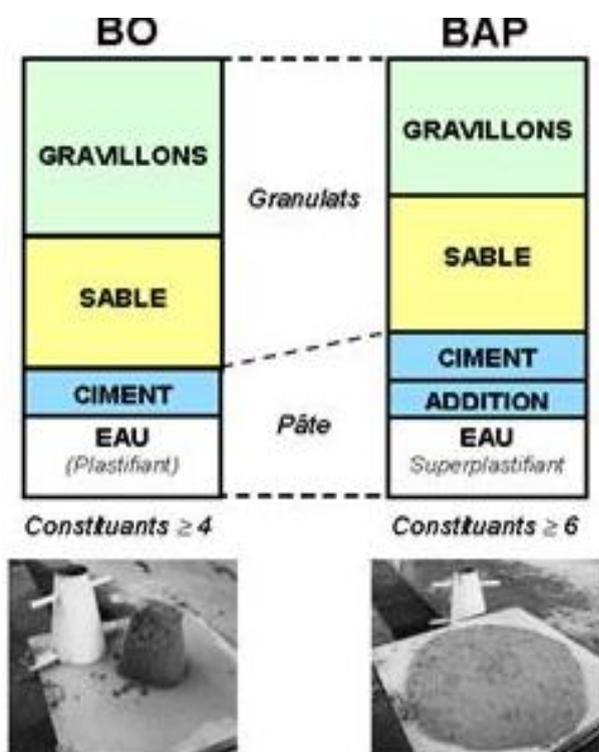


Figure 1.2 – Compositions et aspects à l'état frais d'un béton ordinaire BO et d'un BAP.

1.2.1 Quantité de fines importante

Les BAP comportent de grandes quantités de fines (environ 500 kg/m^3) pour limiter les risques de ressuage et de ségrégation et donc garantir le compromis entre stabilité et maniabilité. Toutefois, pour éviter des chaleurs d'hydratation trop grandes (et un coût trop élevé), le liant est fréquemment un mélange de deux, voire de trois constituants, .

Ce sont les exigences de résistance à la compression, les critères de durabilité et les paramètres d'ouvrabilité (fluidité) qui déterminent le choix de ces additions (cendres volantes, laitier de hauts fourneaux, fillers calcaire, etc.) et leurs proportions respectives. L'introduction d'additions minérales entraîne une modification de la porosité de la matrice cimentaire et influence les caractéristiques mécaniques et autoplaçantes du béton (cf. Figure 1.3) [20].

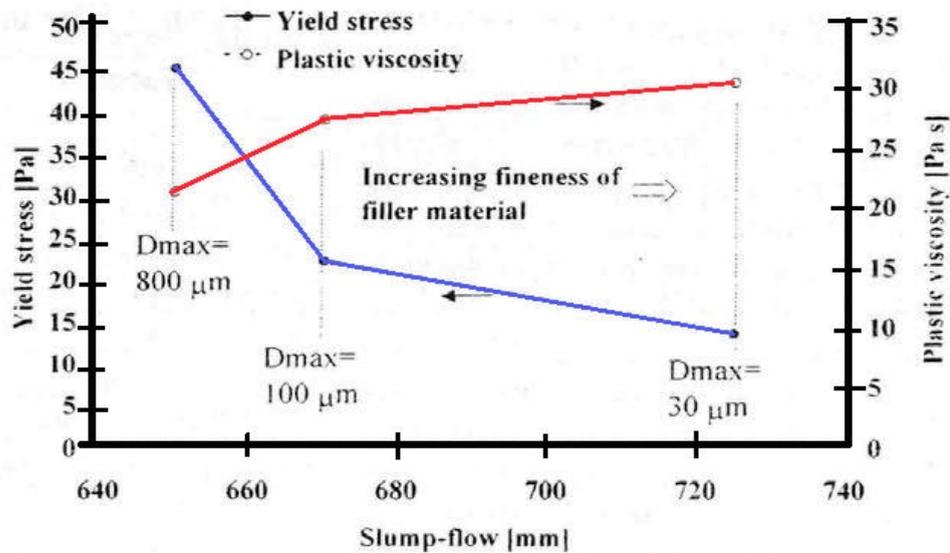


Figure 1.3 – Influence de la finesse du filler sur le comportement rhéologique du béton [20]

1.2.2 Volume de pâte élevé

Les frottements entre granulats sont source de limitations vis-à-vis de l'étalement et de la capacité au remplissage des bétons. Le rôle de la pâte (ciment + additions + eau efficace + air) étant précisément d'écarter les granulats et limiter les contacts, en particulier dans les milieux ferraillés, et ainsi prévenir la formation de voûtes susceptibles de bloquer l'écoulement. Le volume de pâte dans les BAP est donc élevé (330 à 400 l/m^3)

1.2.3 Emploi de superplastifiants

La fluidité des BAP est obtenue en ajoutant des superplastifiants. Ces fluidifiants sont identiques à ceux employés pour les autres types de béton, à savoir des polymères de type polycarboxylate, polyacrylate/polyacrylate esteracrylique. Cette adjuvantation ne doit pas être trop élevée (proche du dosage de saturation) sous peine d'augmenter la sensibilité du béton à des variations de teneur en eau vis-à-vis du problème de la ségrégation et du ressuage. Les superplastifiants interagissent avec les particules du ciment et des fines en s'adsorbant à leur surface pour diminuer le phénomène de floculation au contact de l'eau. Ainsi, les particules sont dispersées par combinaison d'effets électrostatiques et stériques et la proportion d'eau libre est plus importante [21].

1.2.4 Utilisation d'un agent de viscosité (rétenteur d'eau)

L'ajout d'un superplastifiant a pour effet d'augmenter l'ouvrabilité du béton et également de réduire sa viscosité. Afin de minimiser cette dernière, les BAP contiennent souvent un agent de viscosité. Ce sont généralement des dérivés cellulosiques, des polysaccharides, des colloïdes naturels ou des suspensions de particules siliceuses, qui interagissent avec l'eau et augmentent sa viscosité. Ils ont pour but d'empêcher le ressuage et les risques de ségrégation en rendant la pâte plus épaisse et en conservant une répartition homogène des différents constituants.

Cependant, l'action de ces produits est, d'une certaine façon, opposée à celle des superplastifiants. La formulation d'un BAP requiert donc la sélection d'un couple (agent de viscosités - superplastifiants) compatibles et l'optimisation de leur dosage (cf. Figure 1.4).

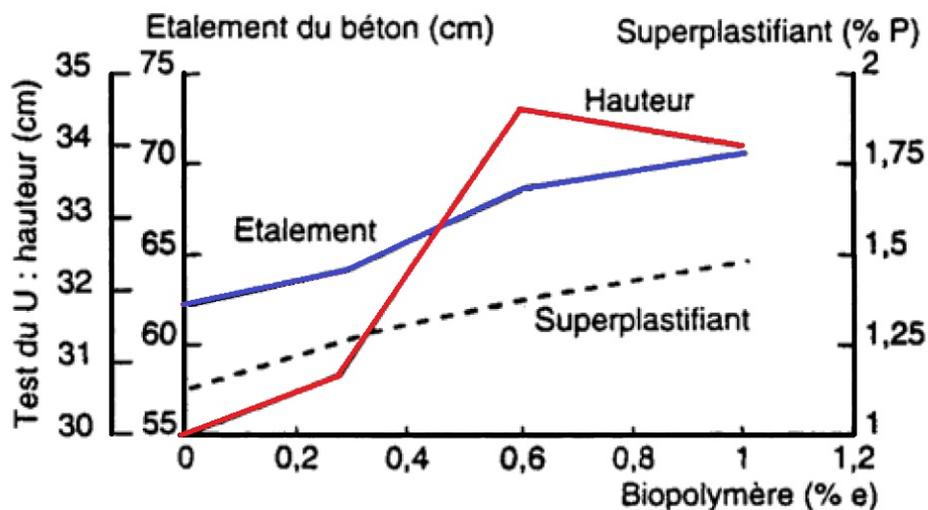


Figure 1.4 – Optimisation du dosage de l'agent de viscosité et super-plastifiant, d'après [22]

Ces produits semblent utiles pour des bétons ayant des rapports eau/liant (E/L) élevés, les fines n'étant alors pas suffisantes pour fixer l'eau dans le béton. En revanche, leur utilisation ne se justifie pas pour des BAP ayant des rapports E/L faibles. Pour les bétons intermédiaires, leur utilisation doit être étudiée au cas par cas. Les agents de viscosité ont aussi la réputation de rendre les BAP moins sensibles à des variations de la teneur en eau à l'égard des problèmes de ressuage et de ségrégation, mais ils peuvent conduire à des entraînements d'air excessifs et à une diminution de la fluidité [18].

1.2.5 Faible volumes des gravillons

Les BAP peuvent être formulés avec des granulats roulés ou concassés. Les granulats sont à l'origine du blocage du béton en zone confinée et leur volume doit être limité. Toutefois, comme ils conduisent par ailleurs à une augmentation de la compacité du squelette granulaire du béton, ils permettent de réduire la quantité de liant nécessaire à une bonne ouvrabilité et une résistance souhaitée. Ces deux facteurs conduisent à prendre pour les BAP un rapport gravillon/sable (G/S) de l'ordre de 1 et qui peut être corrigé selon le confinement de la structure étudiée.

Le diamètre maximal des gravillons (D_{max}) dans un BAP est compris classiquement entre 10 et 20 mm, mais comme les risques de blocage pour un confinement donné augmentent avec (D_{max}), cela conduit à diminuer le volume de gravillon.

En résumé, les composants de base d'une formulation de BAP sont identiques à ceux d'une formulation de béton vibré mais leurs proportions sont différentes (cf. Figure 1.5). Afin d'obtenir les propriétés requises à l'état frais d'un BAP, une importante quantité de fines et l'incorporation d'adjuvants (notamment les superplastifiants) sont nécessaires.

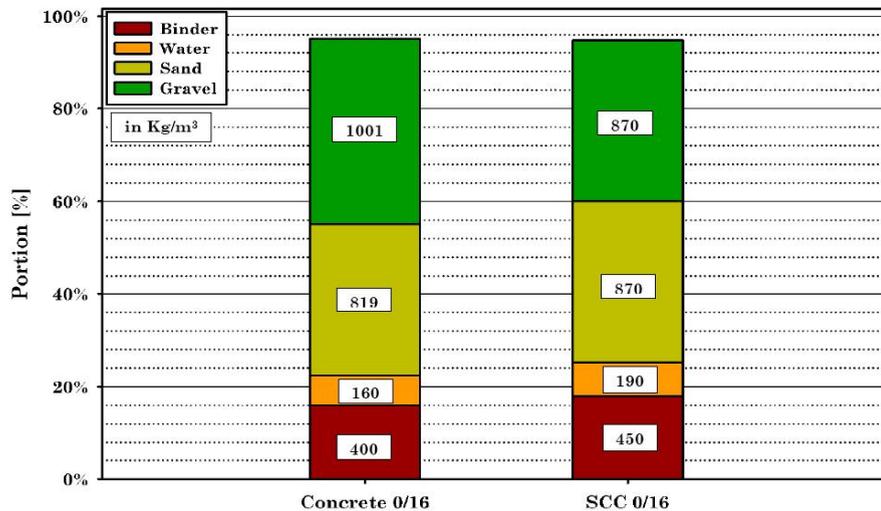


Figure 1.5 – Comparaison entre une composition de BAP et celle d'un béton vibré [23]

1.3 Différents types d'ajouts

Les ajouts cimentaires sont des matériaux présentant une granulométrie très fine et sont souvent incorporés dans le ciment, et quelquefois dans le béton. Les ajouts permettent soit d'améliorer les caractéristiques du béton ou de lui conférer des propriétés spécifiques. Les ajouts sont moins coûteux que le ciment portland et permettent d'obtenir un ciment composé plus économique.

Selon la norme ENV 206, paragraphe 3.1.5, il existe deux types d'addition :

- **Les additions de type I** : ce sont des matériaux quasiment inertes, organiques naturels ou synthétiques spécialement sélectionnés et qui par leur composition granulométrique, améliorent les propriétés physiques du ciment portland (ouvrabilité, pouvoir de rétention d'eau). Parmi ces additifs on distingue le calcaire, la poussière et les fillers ;
- **Les additions de type II** : ce sont des matériaux inorganiques finement broyés à caractère, pouzzolanique ou hydraulique latent. Ils ont une teneur élevée en dioxyde de silicium seul ou en dioxyde de silicium et dioxyde d'aluminium combinés. Parmi ces additifs on distingue la fumée de silice, le laitier, les cendres volantes et les pouzzolanes naturelles.

Le laitier de hauts fourneaux est un sous-produit des usines sidérurgiques formé essentiellement de silicates et d'aluminosilicates de calcium et d'autres substances minérales. Une fois sorti du four, il subit un refroidissement rapide avec un jet d'eau qui lui donne une structure vitreuse apte à réagir en présence de l'hydroxyde de calcium libéré par l'hydratation du ciment.

Boukendakdji [24] a remarqué que l'étalement des mélanges de béton confectionnés avec des superplastifiants PC (à base de polycarboxylate), sont plus élevés par rapport aux mélanges avec des superplastifiants PNS (à base de naphthalène sulfonate). Il a montré aussi que pour les deux types des superplastifiants, la pente du graphe diminue à partir de plus de 15% de laitier, ce qui veut dire que ce pourcentage est le meilleur du point de vue ouvrabilité (cf. Figure 1.6).

Li et Ding [25] ont trouvé que l'incorporation du laitier à raison de 20 à 30% dans le mortier améliore son ouvrabilité. Necira et al [26] ont eu un étalement d'environ 680 mm avec 40% de laitier et un étalement d'environ 625 mm pour 15% de laitier dans le mélange, contre 750 mm pour boukendakdji [24] .

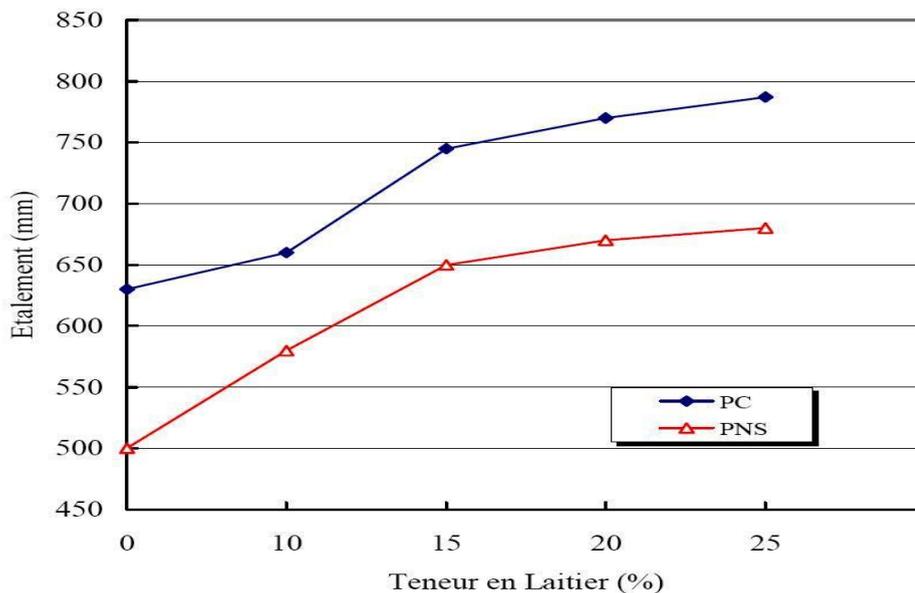


Figure 1.6 – Étalement par cône d'Abrams des BAP en fonction de la teneur en laitier [24].

Les fillers calcaires ont principalement un effet physique de comblement de vide et d'amélioration de la porosité. Des travaux récents [27, 28] laissent entrevoir une autre efficacité provenant de réactions superficielles entre les grains de calcite et le ciment, d'où on peut tirer les constatations suivantes :

- Le calcaire réagit avec les aluminates du ciment pour former des carboaluminates de calcium hydratés [29].
- L'ion CO_3 peut se substituer aux ions SO_4 dans les sulfates hydratés [29].
- Le calcaire finement broyé accélère l'hydratation du ciment et plus particulièrement celle de son composé principale ; le silicate tricalcique [28, 30].

Ghezal [31], a formulé deux bétons autoplacants avec différents pourcentages en fumée de silice et de fillers calcaires dont la dimension des particules est de l'ordre de $3 \mu\text{m}$ et un ciment portland. L'auteur a constaté que les deux bétons présentent des paramètres rhéologiques acceptables mesurés avec le rhéomètre IBB (rhéomètre utilisé à l'université de Sherbrooke), et les valeurs de la capacité de remplissage mesurées avec l'essai du caisson sont très satisfaisantes.

Ogawa et al. (1995) (rapporté par [32]) ont développé des formulations de bétons fluides (d'étalement = 650 ± 30 mm) qui présentent de faibles pertes d'étalements au cours du temps (maximum 30 mm après 60 min.). Ces bétons de rapports E/C de $0,55 \pm 5\%$, contiennent du filler calcaire, un volume de la pâte supérieur à 300 L, des granulats concassés de diamètre maximum 20 mm, un rapport volumique de Sable/Granulats de 51%, 8 kg/m^3 de superplastifiant (Naphtalène) et 3 kg/m^3 d'agent colloïdal à base de

polyacrylate. Ils ont trouvé que pour un remplacement de 20% du volume des granulats par le filler calcaire, on obtient les meilleures fluidités. De même qu'ils ont obtenus de bonnes résistances à la ségrégation et au ressuage. Les mêmes bétons ont été étudiés vis à vis du retrait à une température de 20°C et une humidité relative de 60%. On constate que les bétons contenant des agents expansifs, des réducteurs de retrait et du filler calcaire, présentent une réduction très significative du retrait ($< 400 \mu\text{m}/\text{m}$) et de la fissuration des surfaces.

Alyamaç et Ince [15] ont proposés un monogramme pour évaluer les propriétés mécaniques du BAP à partir des paramètres de formulation et les propriétés à l'état frais des BAP (rapport agrégats/ciment, E/C et l'étalement). Les valeurs d'étalement varient de 55 à 75 pour les 47 BAP étudiés. La figure 1.7 illustre les résultats des propriétés à l'état frais et durci des BAP à base de la poudre de marbre.

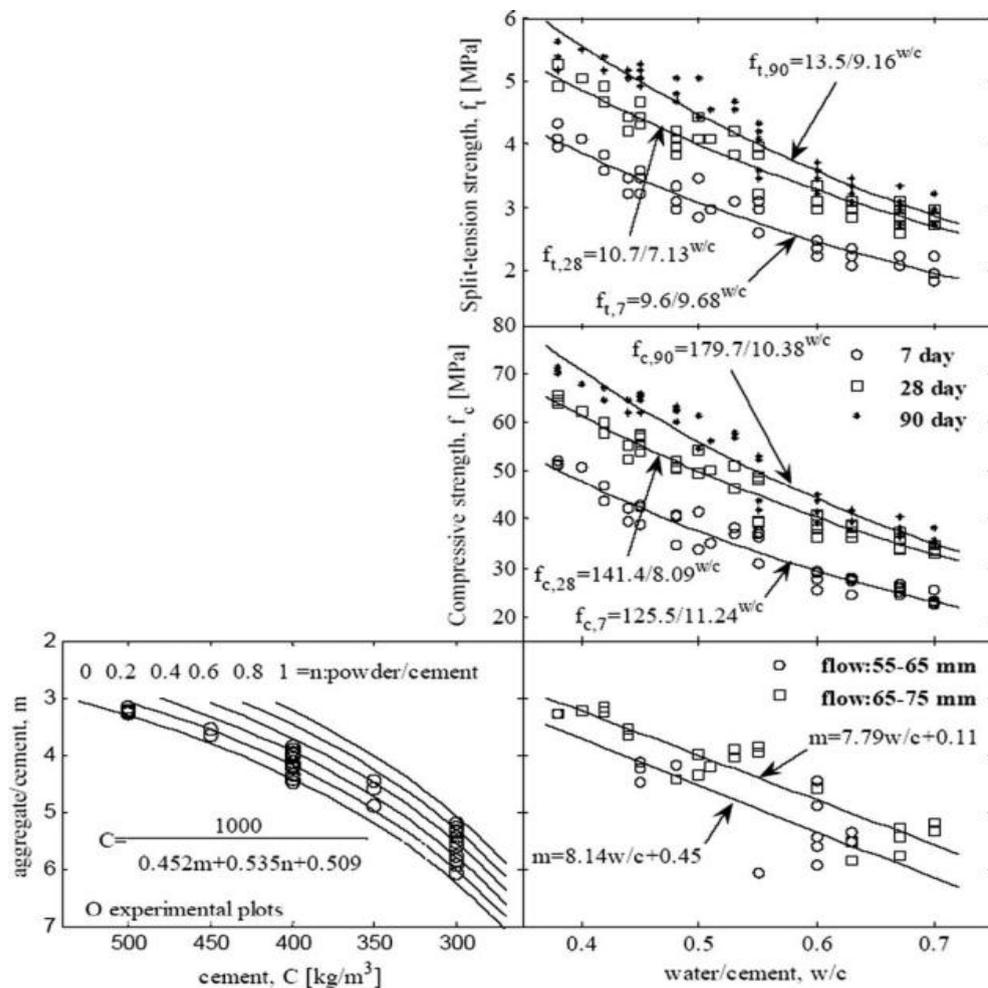


Figure 1.7 – monogramme de conception de béton autoplaçant à base de la poudre de marbre [15].

Les pouzzolanes sont des roches pyroclastiques formées de fragments de magma (pyroclastites) projetés dans l'atmosphère lors d'éruptions volcaniques et refroidis au cours de

leur parcours aérien. La vitesse de refroidissement relativement importante, qui applique un effet de trempe au magma, explique que le verre volcanique (matière amorphe, non cristallisée) soit un des composants majeurs des matériaux pouzzolaniques, ainsi que d'autres minéraux magmatiques (feldspaths, pyroxène, olivine, oxyde de fer) et les xénolites. Les éléments constitutifs des pouzzolanes naturelles présentent une texture scoriacée vacuolaire. D'après leurs tailles, on distingue les cendres (inférieure à 2 mm), les lapillis (2 à 64mm) et des blocs de bombes (supérieur à 64 mm). La couleur de la pouzzolane est généralement noire au rouge (rouge brique à brun foncé) selon le degré d'oxydation du fer, présent respectivement sous forme de magnétite ou d'hématite.

Les pouzzolanes naturelles sont essentiellement composées de silice SiO_2 d'alumine Al_2O_3 et d'oxyde ferrique Fe_2O_3 .

Selon Güneyisi et Gesoglu [33], les BAP confectionnés avec des ciments pouzzolaniques (PPC) ou des ciments calcaires (PLC) ont baissé la demande en superplastifiant. L'utilisation de PPC et PLC améliore les propriétés à l'état frais par rapport aux bétons confectionnés par des ciments portland (PC), en particulier dans le cas du temps d'étalement T_{500} , du temps d'écoulement par V-funnel, et la capacité de remplissage par la boîte en L. D'autre part, les propriétés mécaniques sont comparables au béton sans ajouts. Güneyisi et al montrent aussi qu'il est possible de produire un béton autoplaçant avec du ciment pouzzolanique ou du ciment calcaire avec une performance supérieure ou comparable à celle du ciment Portland. En outre, l'utilisation du laitier de hauts fourneaux granulé dans le ciment ordinaire amélioré considérablement les caractéristiques à l'état frais du BAP.

Tableau 1.1 – Propriétés à l'état frais des BAP [33]

N° Essai	Désignation	Etalement (mm)	$T_{500}(s)$	H_1/H_2	V-funnel (s)	R_{c56j}
M ₁	Control-PC	705	5.8	0.88	22.2	69.1
M ₂	Control-PPC	650	4.0	0.91	16.4	66.1
M ₃	Control-PLC	670	4.0	0.92	22.4	65.9

La plus grande partie de l'évolution des résistance se produit à partir de l'âge de 7 jours. Toutefois, à 28 jours les résistance du mortier contenant de la pouzzolane sont comparable à celles du mortier témoin, et à 45 jours elles deviennent supérieur. Pour 30% de pouzzolane les résistances sont comparables et deviennent supérieures à celles du ciment ordinaire en augmentent sa surface spécifique [34].

Belas et al [35] présentent l'évolution relative de la résistance à la compression des différents bétons pouzzolaniques par rapport à la résistance à 28 jours (cf. Figure 1.8). Il est montré que la performance mécaniques se développent dans les premiers jours de

l'hydratation pour le béton témoin et après 28 jours pour les bétons pouzzolaniques ; le béton avec 20% de pouzzolane atteint la même résistance que le béton ordinaire. En plus, à un jour d'hydratation, les résistances des bétons sont identiques dues à une forte activité de la pouzzolane au très jeune âge.

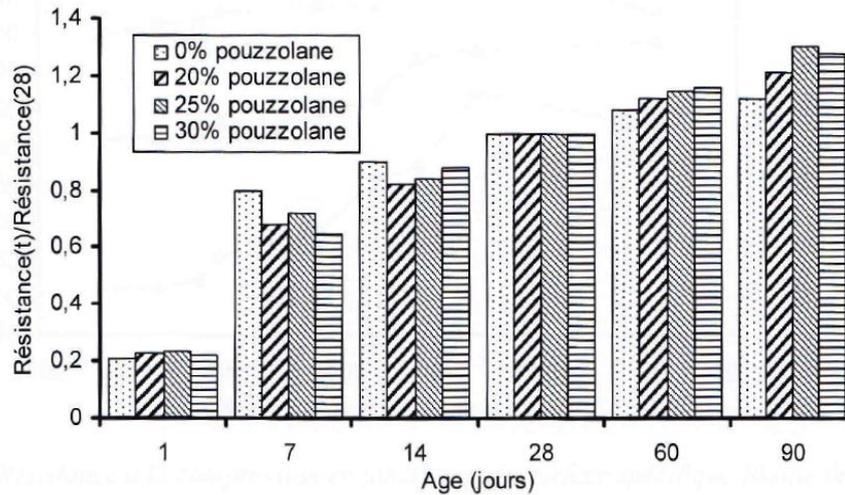


Figure 1.8 – Evolution de la résistance à la compression relative ($f_{c_j}/f_{c_{28}}$) des bétons pouzzolaniques en fonction de l'âge [35].

Dans une autre étude, Belhachemi [36] met en évidence une valeur optimale de la surface spécifique de la pouzzolane de béni-Saf sur l'évolution des résistances mécaniques comme le montre clairement la figure 1.9. L'effet de la finesse est beaucoup plus prononcé au jeune âge où les résistances à deux jours s'améliorent considérablement pour la pouzzolane la plus fine par contre à 28 jours la finesse ne semble avoir qu'un faible effet sur les résistances.

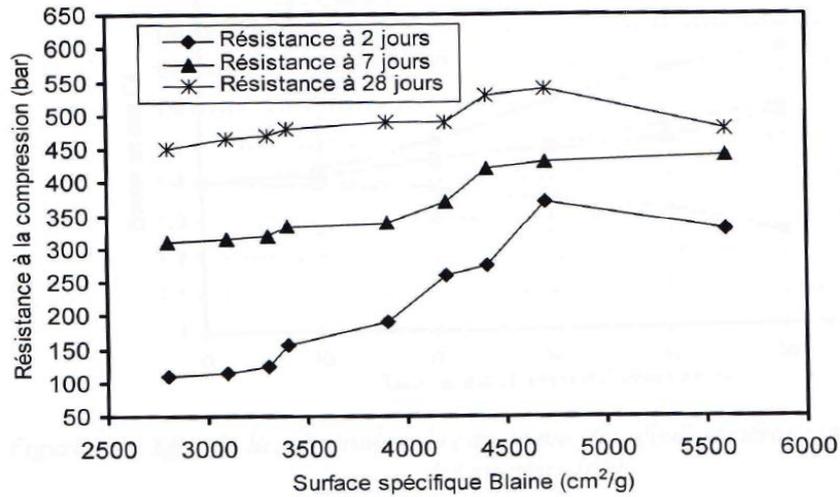


Figure 1.9 – Résistance à la compression en fonction de la surface spécifique Blaine de la pouzzolane de Béni-Saf [36].

Boudchicha et al [37] utilisent une approche qui consiste en la substitution volumique progressive du ciment par les additions minérales dans des mélanges dont le volume absolu des phases solides et l’ouvrabilité sont conservés constants. Pour les additions étudiées (calcaire, laitier et pouzzolane), le besoin en eau des mortiers est d’autant plus important que le taux de substitution du ciment est grand. On remarque sur la figure 1.10 que le mortier avec la pouzzolane présente le plus fort besoin en eau et que la variation de besoin en eau du mortier sans addition est descendante à l’inverse de celle des mortiers avec additions.

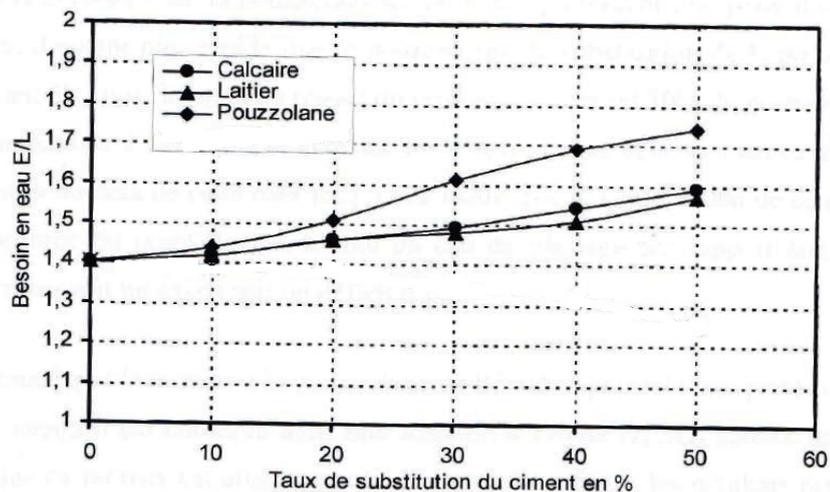


Figure 1.10 – Effet de la substitution du ciment par des ajouts minéraux sur le besoin en eau des mortiers [37].

1.4 Effet synergique

Lorsque les additions minérales sont employées dans des mélanges ternaires, il se crée une synergie entre les différentes substances. Le potentiel électrocinétique entre les grains conduit à une plus grande défloculation, ce qui fait augmenter la surface spécifique du ciment en donnant plus de contact avec l'eau. Ainsi les produits d'hydratation seront multipliés et d'une meilleure qualité. Isaia et al [38] observent que les mélanges ternaires comportant des ajouts avec une activité pouzzolanique moins active avec une autre très active, produisent un effet synergique par rapport aux mélange binaires, cet effet est autant plus important que le taux de substitution augmente. En moyenne, l'effet pouzzolanique est plus important pour les faibles résistances tandis que l'effet filler devient important pour les résistances élevées et d'autant plus à long terme.

1.5 Les bétons autoplaçants

1.5.1 Concept du béton auto-compactant

Au Japon, le nombre d'ouvriers qualifiés dans la construction n'a cessé de diminuer depuis le début des années 80, engendrant une perte de connaissance, notamment dans les techniques de vibration du béton. L'utilisation de bétons très fluides, ne nécessitant pas d'apport d'énergie extérieure pour le serrage, est apparue comme une solution possible à ce problème [39].

1.5.2 Caractérisation des BAP à l'état frais

En France, trois essais de caractérisation ont été préconisés en l'an 2000 par l'Association Française de Génie Civil [40]. D'abord provisoires, ces recommandations sont devenues sur site les essais de référence pour valider une formule de BAP. Ces essais sont l'essai d'étalement, l'essai de la boîte en L et l'essai de la stabilité à tamis.

L'essai classique au cône d'Abrams est utilisé pour mesurer un étalement, dont le diamètre est proportionnel au seuil de cisaillement du béton. Il donne donc une indication sur sa capacité à s'auto-compacter en milieu non confiné.

Lors de l'essai de la boîte en L, deux mesures sont réalisées, la hauteur en amont (H_1) et en aval (H_2) de la boîte en L. Le taux de remplissage final (H_2/H_1) renseigne sur la mobilité du béton en milieu confiné.

L'essai de stabilité au tamis permet de qualifier le BAP vis-à-vis du risque de ségrégation. Pour cela la mesure de masse de laitance traversant le tamis est nécessaire. Le pourcentage P de laitance traversant le tamis par rapport à la masse totale d'échantillon est donc

calculé et le béton est considéré homogène si le pourcentage est inférieur à 15%.

Une fois que le BAP est caractérisé par ses trois essais fondamentaux d'autres essais expérimentaux du BAP à l'état frais peuvent être réalisés, parmi ces essais on distingue :

- L'Essai J-Ring ;
- L'Essai d'écoulement à l'entonnoir en V ;
- L'Essai d'écoulement au tube en U ;
- L'Essai d'écoulement au caisson.

1.5.2.1 Essai J-Ring

L'essai du J-Ring (Japanese Ring) consiste à associer un anneau d'armatures à l'essai de l'étalement au cône d'Abrams. L'anneau d'armatures et le cône d'Abrams sont centrés avant de relever le cône et d'observer l'étalement du béton à travers les armatures.

Le test J-Ring permet d'évaluer la différence entre le comportement du béton sans et avec obstacles. Ainsi, l'essai de l'étalement au cône d'Abrams doit être effectué deux fois, la seconde fois en utilisant l'anneau d'armatures. La différence entre les diamètres moyens des deux essais met en évidence la perte de remplissage due à la présence d'armatures. Pour un béton autoplaçant cette différence doit être inférieure à 5 cm. Cet essai est essentiellement utilisé dans le cas des bétons autoplaçants fibrés (cf. Figure 2.10).

1.5.2.2 Essai de l'écoulement à l'entonnoir (V-funnel)

Cet essai permet une évaluation qualitative du béton autoplaçant [41] : il caractérise la capacité de passage du béton à travers un orifice. L'entonnoir existe en dimensions différentes, et il est destiné à imposer un écoulement du même type que celui imposé entre deux armatures parallèles. Le plus souvent, la partie inférieure de l'entonnoir est rectangulaire de dimensions 7,5 cm x 6,5 cm. Elle est équipée d'une trappe.

L'essai consiste à observer l'écoulement du béton à travers l'entonnoir et à mesurer le temps d'écoulement entre le moment où la trappe est libre et le moment où on aperçoit le jour par l'orifice. Le béton autoplaçant doit s'écouler avec une vitesse constante ; un simple changement de vitesse de l'écoulement est un signe de blocage, donc de ségrégation dans le béton. Cet essai permet aussi d'évaluer la viscosité du béton lors de l'écoulement : pour des bétons de même étalement au cône d'Abrams par exemple, la viscosité est d'autant plus élevée que la durée de l'écoulement à l'entonnoir est longue [41].

Le temps d'écoulement du béton autoplaçant à l'entonnoir doit être généralement inférieur à 12 secondes [42]. Quelques recommandations visent un temps compris entre 5 secondes et

12 secondes pour obtenir un béton de viscosité suffisante (cf. Figure 2.7). Un essai similaire à celui de l'entonnoir (mais de forme cylindrique) a été développé par Bartos [43], et appelé Orimet. Un béton autoplaçant doit avoir un temps d'écoulement inférieur à 5 secondes. Ce dispositif peut être associé à l'essai J-Ring : le béton occupant le dispositif Orimet est directement déversé sur une plaque métallique au centre de l'anneau d'armatures.

1.5.2.3 Essai de l'écoulement au tube en U

De principe identique à l'essai de l'écoulement à la boîte en L, l'essai du tube en U permet de tester la capacité de passage du béton à travers des armatures, et le taux de remplissage du béton. Le dispositif d'essai (cf. Figure 1.11) est composé de deux compartiments R1 et R2, séparés par une grille d'armatures et une trappe coulissante. Différentes dimensions et espacements existent pour les armatures entre les deux compartiments (variation selon les types de chantier, es spécifications des différents pays). Le béton est versé dans la partie R1 de façon continue, on ouvre la trappe laissant passer le béton à travers la grille d'armatures, jusqu'à l'arrêt de l'écoulement (équilibre atteint). La hauteur de remplissage atteinte correspond à la facilité du béton à se mettre en place dans un milieu confiné. Pour un béton autoplaçant, la hauteur de remplissage est généralement supérieure ou égale à 30 cm [41].

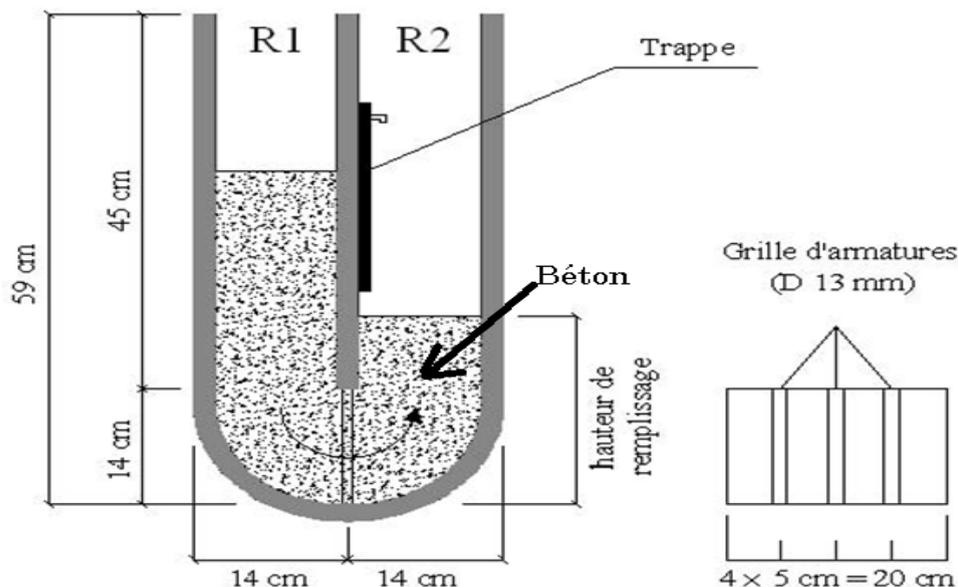


Figure 1.11 – Schématisation de l'essai du tube en U

1.5.2.4 Essai de l'écoulement au caisson

Cet essai simule le comportement d'un béton dans un milieu fortement ferraillé, et consiste à évaluer le taux de remplissage dans ce milieu (cf. Figure 1.12). Il est généralement

destiné au test des bétons très fluides, ne contenant pas de gravier de taille supérieure à 25 mm. Son avantage principal réside en la visualisation du comportement autoplaçant du béton.

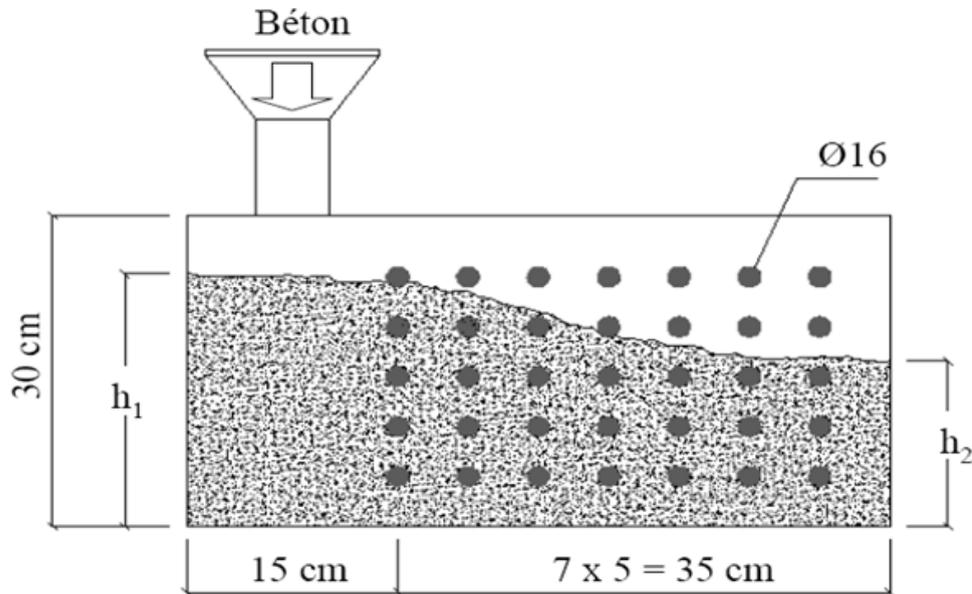


Figure 1.12 – Schématisation de l'essai du caisson

Ce test consiste à verser le béton dans la partie gauche du caisson jusqu'à atteindre la hauteur h_1 des armatures supérieures. Une observation visuelle est effectuée afin de juger qualitativement de la capacité de passage et de remplissage, et de noter la présence d'un certain blocage. Une caractérisation quantitative du taux de remplissage $R(\%)$ est possible par la relation suivante [41]

$$R(\%) = \frac{h_2}{h_1} \cdot 100 \quad (1.1)$$

Où h_1 et h_2 sont les hauteurs mesurées du béton (après l'arrêt de l'écoulement) de part et d'autre du caisson (cf. Figure 1.12). Pour un béton autoplaçant, le taux de remplissage au caisson doit être supérieur à 60% [18]

1.6 Formulation et compositions des BAP

Pour formuler les bétons ordinaires, la méthode la plus utilisée dans l'industrie est celle dite de Dreux-Gorisse. Elle propose des différents abaques pour estimer les dosages en eau et en ciment permettant d'obtenir la résistance et l'affaissement souhaités. Elle se distingue également par une méthode originale pour proportionner les granulats, qui consiste à caler la courbe granulométrique du mélange sables/gravillons sur une courbe de référence.

La mise au point d'une formule de BAP est beaucoup plus complexe, parce que, d'abord,

les constituants sont au nombre minimal de six, contre quatre dans le cas des bétons ordinaires. Ensuite, le cahier des charges d'un BAP comporte plus de clauses, en particulier à l'état frais ; il faut réaliser, en plus de l'essai au cône, l'essai à la boîte en L et l'essai de stabilité au tamis. Enfin, et surtout, les propriétés des BAP sont contradictoires ; un béton riche d'une pâte fluide est très sensible à la ségrégation.

Plusieurs approches de formulation des BAP ont été élaborées [44] à travers le monde (approche japonaise, approche suédoise, approche du LCPC, etc.) pour répondre aux exigences d'ouvrabilité de ce type de béton.

- l'approche Japonaise [45], [46] concerne des formulations fortement dosées en ciment et contenant une proportion d'eau réduite. La quantité de ciment très importante (450 à 600 kg/m^3) est nécessaire pour augmenter le volume de pâte afin d'améliorer la déformabilité du mortier. Ce volume important de pâte limite par conséquent les interactions inter-granulats (dont la quantité est parallèlement diminuée) et l'utilisation d'adjuvants tels que les superplastifiants et les agents de viscosité permettent d'en contrôler la fluidité et la viscosité. Cette approche de formulation conduit toutefois à des bétons de hautes performances mécaniques, onéreux et mal adaptés à des ouvrages courants ;
- L'approche suédoise de formulation repose sur le remplacement d'une partie du ciment par des fines minérales [47]. Ces additions, comme les fillers calcaires par exemple, permettent d'obtenir un squelette granulaire plus compact et plus homogène. La quantité d'adjuvant nécessaire à l'obtention d'une fluidité et d'une viscosité données est alors diminuée. Leur utilisation conduit également à conserver des résistances mécaniques et des chaleurs d'hydratation raisonnables

La plupart des formules des BAP sont conçues actuellement de manière empirique. La méthode de Dreux-Gorisse n'est en effet pas adaptée, car elle ne prend en compte ni les adjuvants ni les additions. La formulation se fait donc sur la base de l'expérience acquise ces dernières années. Par chance, le cahier des charges des BAP est très souvent réduit à sa plus simple expression, puisqu'il ne concerne que les propriétés à l'état frais. En fait, le client majoritaire des fabricants de BPE (béton prêt à l'emploi), et notamment de VM Matériaux (groupe de commercialisation du BAP), est l'industrie du bâtiment, qui utilise principalement des bétons de 25 à 35 MPa. Or, par expérience, on sait que ces résistances «ordinaires» sont facilement atteintes par les BAP (d'autant plus que leurs rapports E/C sont proches de ceux des BO qu'ils doivent remplacer). En outre, l'aspect économique n'est pas encore le critère prédominant de la formulation ; les dosages en superplastifiant et en fines ne sont donc pas bornés. Les compositions usuelles sont comme suit :

- Le volume de gravillons est limité en prenant un rapport G/S (masse de gravillons sur masse de sable) proche de 1.
- Le volume de pâte varie entre 330 et 400 l/m^3 .
- La masse de ciment est supérieure ou égale au minimum requis par la norme du BPE (P18-305), soit en général de 300 à 350 kg/m^3 . En complément, la masse d'addition se situe entre 120 et 200 kg/m^3 .
- Le dosage en superplastifiant est proche de son dosage à saturation.

La formulation se fait par tâtonnement sur la base de ces plages. Certains formulateurs ont certes développés leur propre outil. Ce sont le plus souvent des méthodes dérivées de la méthode Dreux- Gorisse, avec une courbe granulométrique de référence englobant les éléments fins. Après la conception sur le papier, la formule est vérifiée et optimisée par des essais effectués la plupart du temps directement en centrale à béton.

Il existe dans la littérature des techniques de formulation moins empiriques. On présente ci-dessous une revue des grandes familles d'approches.

1.6.1 Méthodes basées sur l'optimisation des mortiers

Okamura [48], le concepteur des BAP, propose de les formuler en composant en premier lieu le mortier du béton. Dans le mortier, la proportion de sable est posée arbitrairement. Il reste ensuite à trouver expérimentalement les dosages en eau et en superplastifiant, pour un liant donné (rapport massique ciment sur addition fixé), et suivant certains critères de rhéologie. La formule finale est obtenue en ajoutant au mortier un volume de gravillons limité, de manière sécuritaire, à la moitié de leur compacité. A la suite d'une optimisation identique du mortier, Ouchi et al [49] proposent de doser les gravillons en cherchant expérimentalement leur volume limite menant à un blocage. Ce volume est évalué en comparant l'écoulement du mortier dans un entonnoir avec et sans gravillons. La formulation d'un BAP par le biais de son mortier trouve sa justification dans quelques publications. Petersson et al [47] et Jacobs et al [23] montrent à cet effet que la rhéologie d'un béton se corrèle bien avec celle de son mortier.

1.6.2 Méthodes basées sur l'optimisation du volume de pâte

Le béton est considéré ici comme un mélange biphasique, avec une phase solide, les granulats, et une phase liquide, la pâte. Dans le cas d'un BAP, la pâte joue un rôle prédominant. Oh et al [50] ont introduit la notion d'excès de pâte schématisée sur la Figure 1.13. La formulation consiste à déterminer la quantité de pâte en excès optimale pour fluidifier le BAP et limiter les problèmes de blocage.

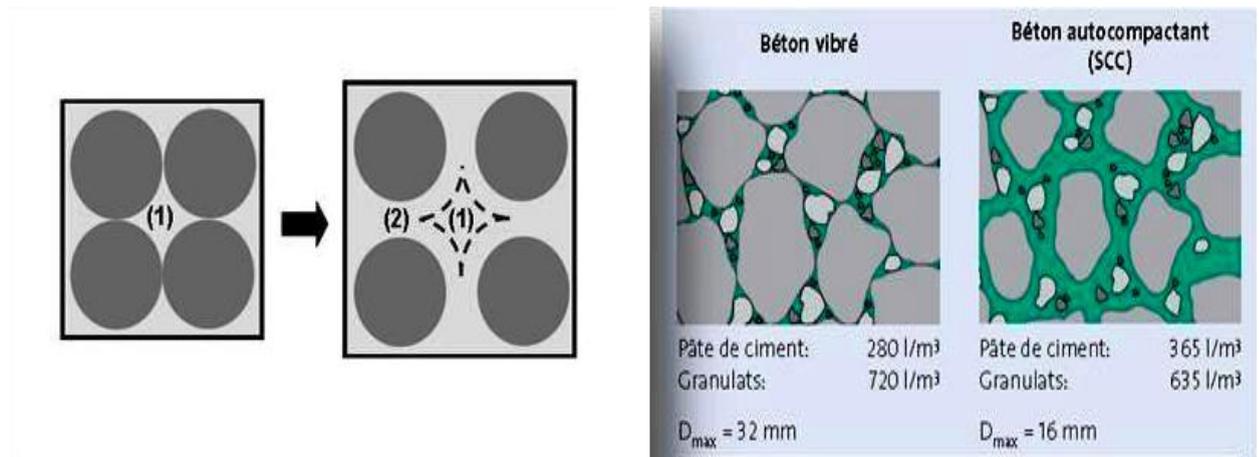


Figure 1.13 – (1) la pâte remplit la porosité (2) et écarte les granulats [50]

Oh et al [50] ont obtenu par l'expérience des équations reliant l'épaisseur de la pâte autour des granulats et les constantes du modèle de Bingham (seuil de cisaillement et viscosité) du béton, exprimées par rapport à celles de la pâte. Lors de la formulation, il faut d'abord optimiser et caractériser la rhéologie de la pâte, puis déterminer à l'aide de ces équations la proportion minimale de pâte nécessaire pour fluidifier le béton. Les auteurs ne proposent pas de méthode pour doser la pâte par rapport au blocage. Il existe une approche similaire du dosage de la pâte mise au point par [51] [47] [52]. Cette fois, deux critères, calés aussi expérimentalement, sont proposés : un volume de pâte minimal vis à vis de la fluidité, et un volume de pâte minimal vis à vis du blocage.

1.7 Principe et application des approches

1.7.1 Approche japonaise

Cette approche privilège le volume de pâte au détriment des granulats [19], [39]. Les bétons obtenus sont sous dosés en granulats et par conséquent loin d'un optimum économique. Le surcoût engendré sur le matériau est compensé, par les économies sur la main d'œuvre. Les principes de formulation et leur application sont les suivants :

- Dosage des gravillons : Les chercheurs japonais ont montré que le risque de blocage est minimisé lorsque le volume du gravillon est limité à la moitié de sa compacité. Par définition, la compacité d'un mélange de grains est le rapport du volume de grains et du volume total du système grains + vides (cf. Figure 1.14). Elle dépend bien sûr du mode de compactage.

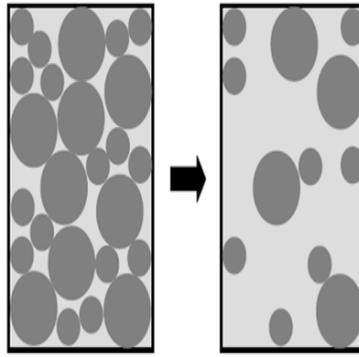


Figure 1.14 – Réduction du volume de gravillon à la moitié de sa compacité

- Dosage du sable : Le volume du sable est posé forfaitairement à 40% du volume de mortier du béton. La fluidité du béton est garantie par la réduction des frictions granulaires.
- Dosage du liant : La méthode ne précise pas comment doser le liant. Néanmoins la quantité de ciment peut être fixée, par exemple, en respectant la donnée des normes (soit ici une masse minimale de ciment de 350 kg/m^3). Les rapports massiques eau sur ciment et filler sur ciment peuvent également être choisis sur des critères de résistance.
- Dosage de l'eau et du superplastifiant : Les dosages en eau et en superplastifiant sont déterminés au moyen d'essais sur mortiers, dont le volume de sable est fixé à 40%. On réalise des mesures d'étalement avec un cône à mortier et des mesures d'écoulement à l'entonnoir.

Les chercheurs ont montré que la relation entre l'étalement et l'écoulement est linéaire lorsque le dosage en eau varie à quantité de superplastifiant constante. A l'aide de peu d'essais, il est alors possible de trouver un couple Adjuvant/Eau permettant de fluidifier de manière optimale le mortier (cf. Figure 1.15). Le dosage en superplastifiant trouvé est de l'ordre de 1% de la masse de fines, le rapport $E/(C+A)$ de 0,23 et la masse de ciment de 400 kg/m^3 .

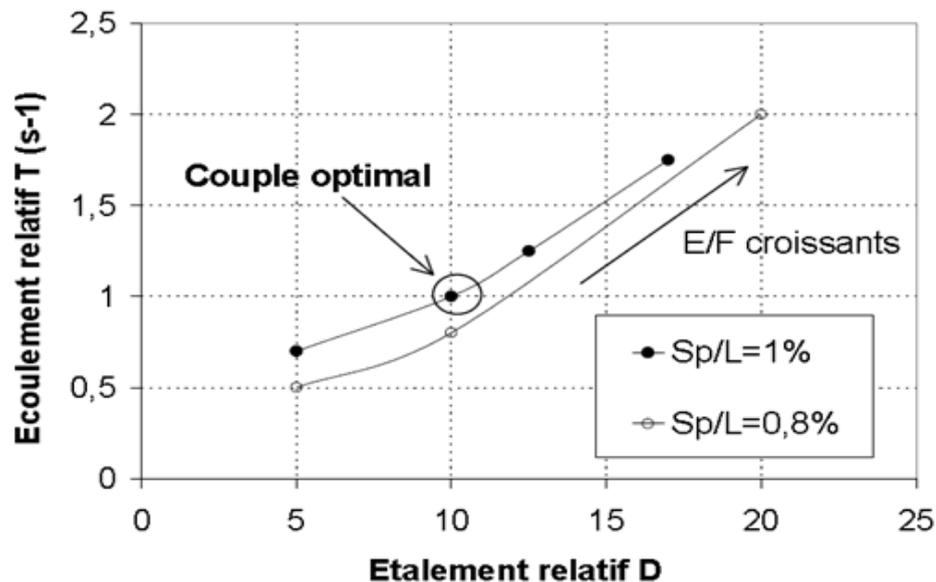


Figure 1.15 – Recherche du dosage en eau et en superplastifiant : écoulement relatif T en fonction de l'étalement relatif D. La flèche indique le sens des rapports massiques eau sur fines E/F croissants. Le couple optimal est indiqué par un cercle [53]

Les différentes propriétés des bétons autoplaçants (fluidité, viscosité, résistance à la ségrégation, aptitude au remplissage etc.) rendent leur formulation relativement compliquée. Même si de nombreuses études ont été effectuées pour comprendre les principes qui régissent le comportement de ces bétons en milieux confiné, aucune méthodologie pratique de formulation ne semble avoir été établie, permettant à un chercheur ou à un ingénieur de fabriquer un béton autoplaçant à partir de données de base sur les matériaux locaux et un cahier des charges précis [18]. Les auteurs définissent alors 2 grandeurs : étalement relatif et vitesse relative d'écoulement la fluidité du mortier, donnée par :

$$\Gamma_m = \frac{d_1 d_2 - d^2}{d^2} \quad (1.2)$$

Avec d_1 et d_2 les diamètres d'étalement selon deux médianes d c'est le diamètre inférieur de mini cône.

la viscosité du mortier, donnée par :

$$R_m = \frac{10}{t} \quad (1.3)$$

Avec t le temps d'écoulement à l'entonnoir exprimé en [s], pour obtenir un béton autoplaçant acceptable, il faut avoir simultanément : $\Gamma_m = 5$ et $R_m = 1$ [s^{-1}].

Cette méthode est générale et simple. Il faut faire attention aux risques de blocages.

Dans le schéma de gauche de la Figure 1.16, l'entraînement des granulats au droit des armatures est facilité par les forces de viscosité (qui sont liées à la viscosité du mortier et à la vitesse d'écoulement).

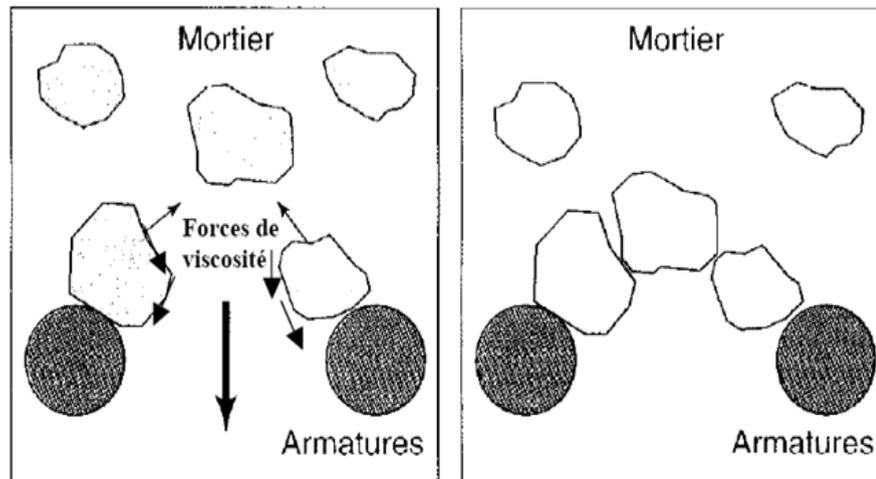


Figure 1.16 – Phénomène de blocage des granulats au droit d'un obstacle d'après [18]

Tangtermsirikul et al [52] ont proposé une approche d'évaluation du risque de blocage du béton en utilisant l'essai de la boîte en L. Ils ont fait l'hypothèse que le phénomène de blocage était indépendant de la nature de la pâte pourvu que celle-ci soit suffisamment fluide. L'expression du risque de blocage R_b s'écrit :

$$R_b = (1 - V_p) \sum_i \frac{y_i}{V_{crit,i}} \quad (1.4)$$

y_i : proportion volumique de grains de taille i rapportée au volume de granulat

V_p : proportion volumique de la pâte dans le béton

$V_{(crit,i)}$: fraction en volume en grain de taille i induisant un blocage

De cette relation on peut déduire pour chaque rapport gravillon sur sable la teneur en pâte minimale pour éviter le blocage en écrivant $R_b = 1$ (en fait, le risque de blocage a lieu si R_b est inférieur ou égal à 1).

1.8 Méthode Suédoise

La méthode suédoise est basée sur l'étude effectuée par [52]. En fait, ils ont repris l'approche d'évaluation du risque de blocage et l'ont intégrée dans le processus de formulation. A l'aide de l'équation (1.4), ils estiment pour un confinement donné et pour chaque rapport G/S, le volume de la pâte critique pour le blocage. Le rapport G/S final est celui qui donne le même volume de pâte pour avoir les propriétés recherchées.

Les fines, l'eau et le superplastifiant sont ajustés par la suite pour obtenir une viscosité suffisante, un faible seuil de cisaillement et la résistance à la compression visée.

Cette méthode propose une meilleure optimisation du squelette granulaire mais le critère de blocage n'est pas général pour tout type de granulat.

1.9 Méthode Française (LCPC)

Au LCPC, un modèle mathématique a été développé par De Larrard et al. [54, 55] à partir d'un modèle de suspension solide (RENE LCPC). Ce modèle est basé sur les interactions granulaires entre les différents constituants du mélange. Il permet de prévoir la compacité d'un mélange granulaire avec une précision inférieure à 1% à partir des constituants ci-après :

- les distributions granulaires
- les proportions du mélange
- la compacité propre
- la densité apparente

La procédure à adopter pour déterminer les proportions des divers constituants est la suivante :

- la proportion de liant est fixée a priori (70% de ciment, 30% d'addition par exemple)
- le dosage, à saturation, du superplastifiant est déterminé. Selon l'expérience du LCPC, ce dosage pourrait conférer au béton une viscosité élevée, la moitié de ce dosage serait plus pertinente
- le besoin en eau de ce mélange (en présence du superplastifiant) est déterminé
- les calculs sont effectués avec le logiciel en tenant compte du confinement (effet de paroi).

La viscosité est fixée de manière arbitraire à 5.10^4 . La teneur en eau est réduite en conséquence et la proportion liant/filler est maintenue constante. Les proportions granulats/phase liante sont optimisées. Une formulation de béton autoplaçant est donc proposée basée sur les prévisions du modèle. La teneur en eau est ajustée pour obtenir la résistance ciblée. Le dosage en superplastifiant est ajusté également afin d'obtenir la valeur d'étalement et le seuil de cisaillement souhaités et par conséquent les propriétés requises pour le béton autoplaçant sont atteintes.

1.10 Comportement à l'état durci

La littérature scientifique rapporte essentiellement des travaux concernant les performances mécaniques (résistance à la compression, résistance à la traction) et le retrait des bétons autoplaçants.

1.10.1 Résistance à la compression des BAP

La formulation des BAP implique un rapport E/C bas, donc de nature à fournir de bonnes résistances mécaniques. Paultre et al [56] ont fait des tests comparant les bétons autoplaçants aux «traditionnels» BHP. Ils ont effectué des essais de compression (pour déterminer la résistance à la compression et le modulé d'élasticité) sur un BAP et un BHP à affaissement plus faible mais ayant une résistance mécanique égale. Les résistances en compression des BAP et des BHP sont comparables, par contre les modules d'élasticité sont moins élevés pour les BAP, comme on peut l'observer sur les résultats de ces essais, consignés dans le Tableau 1.2

Tableau 1.2 – Principales caractéristiques des bétons testés par [56]

Résistance visée (MPa)	60	60	80	80
Nature du béton	BHP	BAP	BHP	BAP
Rapport E/L	0.5	0.42	0.35	0.37
f_{c28} (MPa)	54.1	60	71.9	80.9
Module d'élasticité (E)	38	34.7	40.9	38.7

En ce qui concerne la résistance à la compression et à la traction des BAP, Gibbs et al [57], ont fait des tests comparant les BAP aux bétons de référence, sur des éléments standards :

- cubes de 150 mm, pour mesurer la résistance à la compression
- des cylindres pour la résistance à la traction par fendage

Différentes données ont été publiées [57, 58] sur l'évolution de la résistance mécanique des BAP contenant des fillers calcaires comparée à celle des bétons vibrés (BV) et soutiennent les affirmations précédentes (cf. Figure 1.17).

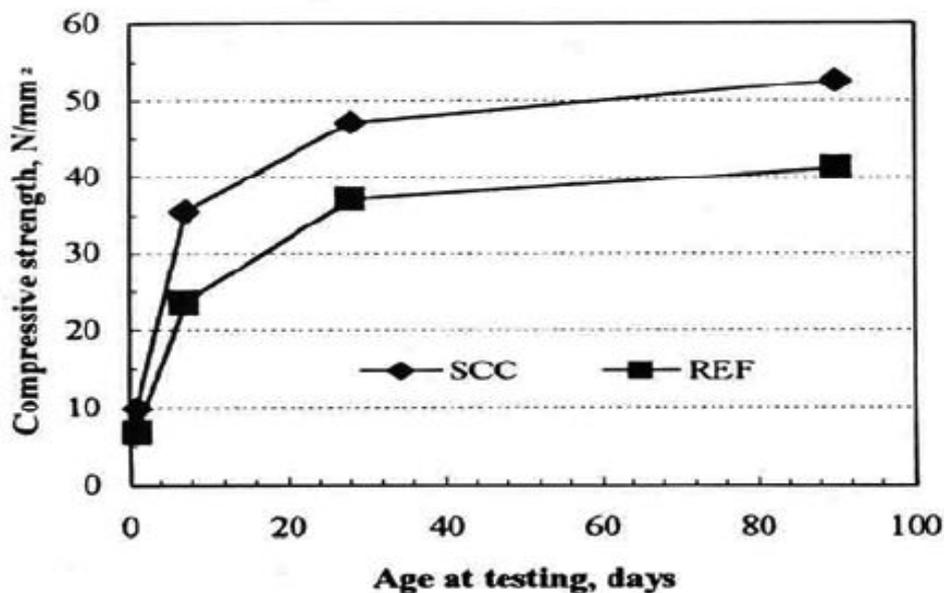


Figure 1.17 – Evolution de la résistance à la compression d'un BAP et d'un BV (REF) [57]

1.10.2 Résistance à la traction des BAP

Le Tableau 1.3 présente les résultats obtenus en compression et en traction à 28 jours pour les bétons autoplaçant (BAP) et un béton vibré de référence (BV) selon [57].

Tableau 1.3 – Résistance à 28 jours pour des éléments standards d'après [57]

Résistance à 28 jours	BAP	Référence (BV)
Résistance à la compression (MPa)	47.2	37.1
Résistance à la traction (MPa)	3.4	2.4
R_{tj}/R_{cj}	0.072	0.065

Les auteurs ont conclu qu'il y a une légère différence entre la résistance à la traction et en compression des bétons autoplaçants et des bétons vibrés.

Les travaux de Gibbs et al [57] ont, aussi, montré que la résistance à la compression à 7 jours est plus élevée pour les BAP que celle du béton vibré de référence. D'après l'auteur c'est la présence de poudre de calcaire qui accélère l'hydratation de C_3S et augmente la résistance à la compression à jeune âge.

Gibbs et al [57] ont constaté qu'il n'y a aucune différence entre la résistance à la traction des BAP et celle des bétons de référence. Par contre, Sonebi et al [58] ont observé que la résistance à la traction à 28 jours pour les BAP (conservés dans l'eau) est supérieure à celle du béton de référence conservé dans les mêmes conditions.

L'étude de Fukute et al, rapportée par [59] montre que le rapport entre la résistance à la traction et à la compression est légèrement plus élevé, en comparaison avec des bétons vibrés. Les modules élastiques à 28 jours sont, eux, plus faibles de quelques GPa que ceux des bétons traditionnels de résistance équivalente. Ambroise et al [60] ont cherché à vérifier expérimentalement si la résistance pouvait être prédite soit par la loi de FERET, soit par celle proposée par De Larrard, qui tient compte d'ajouts dans la matrice cimentaire (les résistances moyennes obtenues sont en général élevées vis-à-vis des taux de gâchage utilisés). Par rapport au résultat expérimental, la loi de FERET s'applique jusqu'à un rapport $(V_e/V_s) = 1,5$, au delà de cette valeur elle sous estime la résistance. Une loi puissance du type $Rc = a[x/(x + b)]^n$ rend mieux compte de l'évolution de résistance en fonction du rapport $x = V_e/V_s$. Ambroise et al proposent la loi suivante :

$$R_c = \left[\frac{x}{(x - 0.37)} \right]^{0.25} \quad (1.5)$$

avec :

R_c = Résistance moyenne à 28 jours

$x = E(C + A)$

E = volume d'eau

C = Poids de ciment (kg/m^3)

A = Poids d'ajout (kg/m^3)

Signalons que Gibbs et al [57] ont fait aussi des tests sur des éléments de structure (poteaux). Leurs résultats montrent que la résistance in situ des BAP est plus proche de la résistance à la compression à 28 jours d'élément standard (cube) que pour les bétons de référence. Ils concluent que les BAP sont plus homogènes et uniformes que les bétons de référence. D'autres travaux [61, 62] confirment aussi que les BAP sont plus homogènes et caractérisés par une grande uniformité de résistance et de densité (l'uniformité des propriétés mécaniques des BAP) que celle du béton de référence.

L'étude de l'effet des conditions de cure sur les BAP [58] a montré que les éprouvettes conservées dans l'eau possèdent des résistances à la compression supérieures à celles conservées à l'air libre, et qu'à 28 jours la différence de résistance à la compression due aux conditions de cure (à l'air, à l'eau) est de 17% pour les BAP, et de 40% pour le béton de référence. Sonebi et Bartos ont conclu que les conditions de cure ont moins d'effet sur les BAP que sur le béton de référence.

1.11 Module d'élasticité instantané des BAP

En ce qui concerne le module d'élasticité, Persson [63] a constaté que ce module ne diffère pas entre un BAP et un BV, tandis que d'autres chercheurs ont indiqué que le module est plus faible que ceux des bétons vibrés [64–67]. Sachant que le module du béton dépend des proportions volumiques de ses constituants et leur module respectif [66], cette différence d'appréciation s'explique par l'augmentation du volume de pâte et la diminution du volume des granulats dans le cas des BAP. Domone [68], a analysé plus de 70 études, il a montré que le module d'élasticité des BAP diffère peu de celui des BV si le rapport G/S est similaire et est inférieur à 1. Par contre, si le rapport G/S est plus élevé pour les BV que pour les BAP, il a trouvé des valeurs du module d'élasticité des bétons autoplaçants plus faibles que celles des bétons vibrés auxquels ils sont comparés. Persson [63] a établi une relation entre le module élastique « E_{ij} » d'un béton et sa résistance à la compression, f_c , valable aussi bien pour des BAP et des BV.

$$E_{ij} = 3.75\sqrt{f_c} \quad (1.6)$$

Le module instantané des bétons autoplaçants sera en moyenne plus faible que celui des bétons ordinaires du fait d'un volume de matrice plus élevé. Le module de la matrice cimentaire est compris entre 6 et 25 GPa, alors que celui des granulats se situe entre 60 et 100 GPa.

Des calculs ont été réalisés par le LCPC à partir d'un modèle d'homogénéisation développé par Le Roy en 1996 et De Larrard et Le Roy en 1992, afin de prendre en compte les proportions pâte/granulats dans la détermination du module instantané des BAP.

Ces résultats ont été comparés aux prévisions du BAEL basées sur la résistance mécanique :

$$E_{ij} = k\sqrt[3]{f_{cj}} \quad (1.7)$$

Avec :

$k = 11\,000$ pour les bétons ordinaires.

Pons et al [69] ont réalisé des mesures de module instantané sur quatre bétons autoplaçants. Les résultats confirment la tendance prévue par le modèle d'homogénéisation du LCPC. Les modules instantanés des BAP sont plus faibles, et le coefficient k de la relation (1.7) varie de 7 850 à 9 700 pour les quatre bétons autoplaçants.

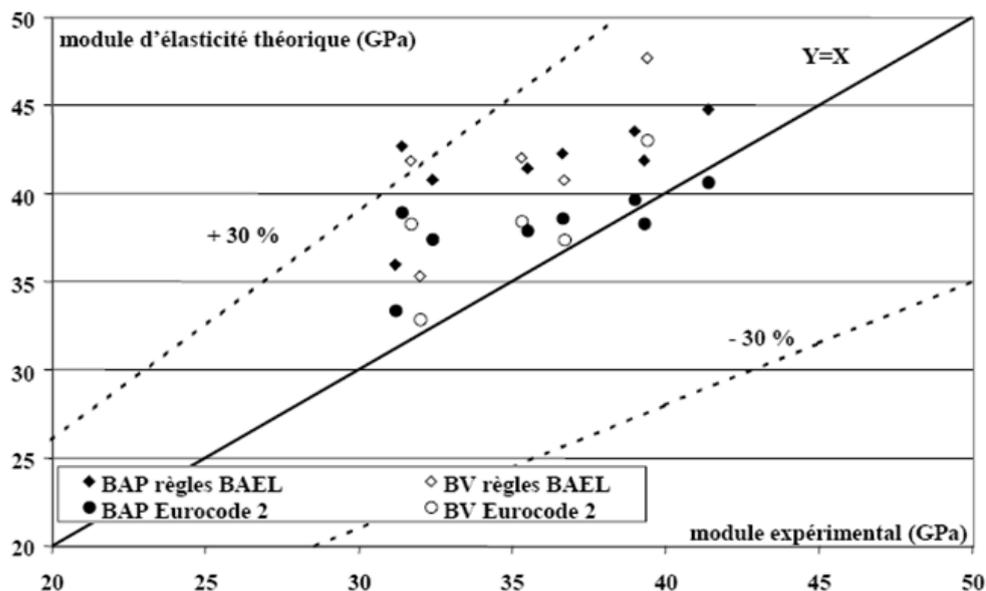


Figure 1.18 – Comparaison des modules élastiques théoriques de BAP et de bétons vibrés avec leurs valeurs expérimentales [69]

1.12 Retrait

En utilisant plusieurs compositions de BAP et une composition traditionnelle, Hu et Barbieri [70] ont conclu que le retrait endogène des BAP était plus faible (les valeurs s'échelonnent entre 50 et 200 $\mu m/m$) que celui des bétons vibrés.

En ce qui concerne le retrait de dessiccation, les mêmes auteurs ont procédé à deux modes opératoires de séchage (mode 1 : séchage immédiat pour se rapprocher des conditions chantier sans cure ; mode 2 : conservation dans l'eau pendant 28 jours). Pour les conditions les moins favorables (mode1), les déformations de retrait dues au séchage des BAP étaient supérieures de 100 $\mu m/m$ à celle du béton traditionnel avec une fourchette de valeurs allant de 450 à 650 $\mu m/m$. Pour le mode 2, les résultats sont plus mitigés car certaines compositions ont des retraits identiques (entre 350 et 550 $\mu m/m$), alors que d'autres affichent des retraits supérieurs de 150 $\mu m/m$. Le Tableau 1.4 fournit l'ensemble de leurs résultats.

Tableau 1.4 – Valeurs des différents retraits à 200 jours d'après [70]

	Endogène	Dessiccation mode 1	Dessiccation mode 2
Plage de variation des BAP (10^{-6})	50 à 200	550 à 650	350 à 550
Valeur du béton ordinaire (10^{-6})	200	450	425

Ogawa et al [71], Rols et al [72] ont constaté que le retrait de séchage des BAP est supérieur à celui des bétons ordinaires et ceci parce que la quantité de fine qu'ils

contiennent est plus importante. Rols et Ambroise [72] ont trouvé une augmentation de 50% du retrait de dessiccation d'un BAP par rapport à celui d'une formulation ordinaire. Quant à Tanaka et al [73], ils n'ont remarqué aucune différences notables (environ $450 \mu\text{m}/\text{m}$ pour la formulation traditionnelle et la composition autoplaçante). Hayakawa et al [74] a observé un retrait de séchage plus faible (environ $200 \mu\text{m}/\text{m}$ de moins à trois mois). Kuroiwa [75] trouve que les BAP sont plus sensibles aux problèmes de cure et qu'à des conditions de cure identiques, le retrait de dessiccation des BAP était plus faible que les bétons ordinaires. Par ailleurs des chercheurs japonais ont comparé les retraits de dessiccation des bétons traditionnels et des bétons autoplaçants de même E/C avec et sans ajout d'urée. Les bétons autoplaçants renferment du filler calcaire à l'inverse des bétons traditionnels. Ces auteurs montrent que les retraits de dessiccation des BAP sont du même ordre de grandeur que les bétons traditionnels après des temps de séchage de 51 et 300 jours. Le retrait de dessiccation est d'autant plus important que le rapport E/C est grand. L'ajout de filler calcaire ne semble pas avoir un rôle prépondérant. Ces données contradictoires résultent de la comparaison des BAP et de béton de compositions totalement différentes en terme de E/C , de volume de pâte, de compacité granulaire etc. On retiendra, compte tenu des connaissances acquises à ce jour, que :

- le retrait endogène des BAP est au plus égal à celui du béton ordinaire
- le retrait de dessiccation des BAP est supérieur ou égal à celui du béton ordinaire.

Benkechkache et al [76] ont trouvé que l'influence générale de la résistance mécanique ne suit pas les évolutions usuellement acquises : une augmentation de la résistance mécanique induit une augmentation de retrait total pour la spécificité autoplaçante. (cf. Figure 1.19)

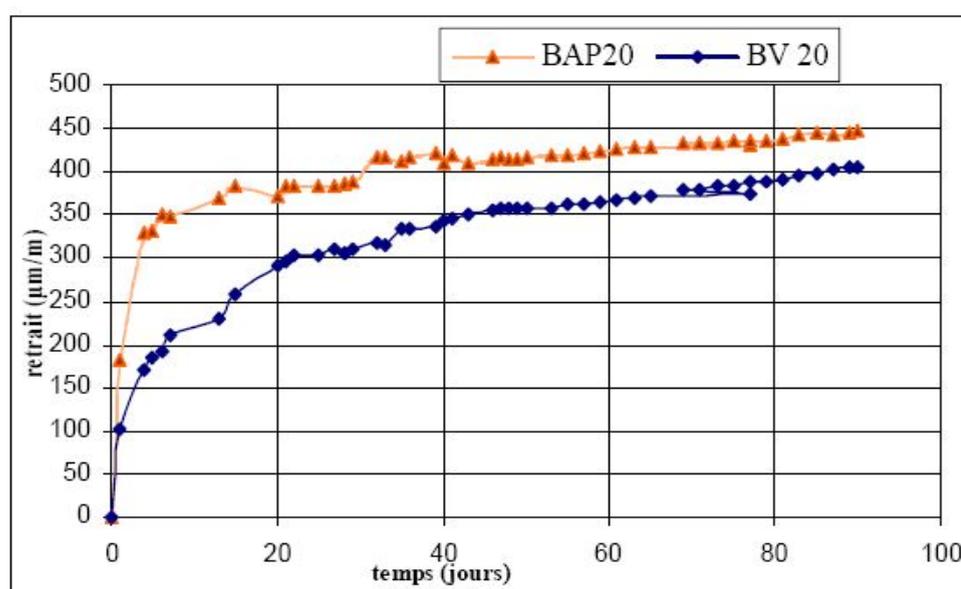


Figure 1.19 – Evolution du retrait (Influence de la nature du béton) [76]

1.13 Fluage

Le fluage étant directement lié à la déformabilité de la matrice cimentaire, on peut s'attendre à ce que les volumes de pâtes des BAP, généralement supérieurs à ceux des bétons ordinaires, conduisent à des déformations de fluage importantes. En première approximation, on peut supposer que l'effet (à résistance égale) sera équivalent à celui obtenu sur le module instantané.

Ce dernier étant communément admis comme indicateur du fluage (BPEL). Selon Persson [63]. Le fluage des BAP augmente significativement lorsque les charges sont appliquées aux jeunes âges, et diminue lorsqu'il s'agit de BAP à hautes performances.

D'après les résultats présentés par Proust [77], les comportements des bétons autoplacants peuvent différer d'une formulation à l'autre (cf. Figure 1.20). Globalement, les BAP subissent des déformations sous charge équivalentes ou légèrement supérieures à celles des bétons vibrés correspondants. Les vitesses de développement des déformations diffèrent peu d'un type de béton à un autre. Ainsi, l'augmentation des déformations différées attendue en raison du volume de pâte plus important, ne semble pas atteinte. D'après ces données, quel que soit le mode de conservation, les BAP possèdent des comportements différés sous charges semblables à ceux des bétons vibrés.

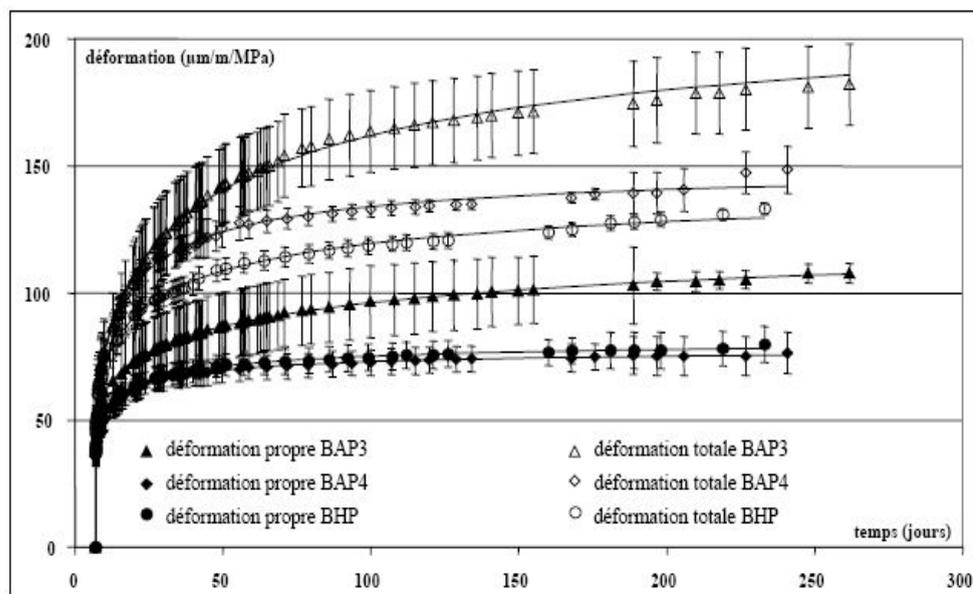


Figure 1.20 – Déformations sous charge unitaire pour des bétons de résistance supérieure à 40 MPa [77]

Pour le fluage total, selon les résultats des travaux antérieurs de la littérature, les valeurs étaient de l'ordre de 1050 à 1800 $\mu\text{m}/\text{m}$ [78]. Selon Benkechache et al [76] le fluage total varie de 460 à 870 $\mu\text{m}/\text{m}$ (cf. Figure 1.21).

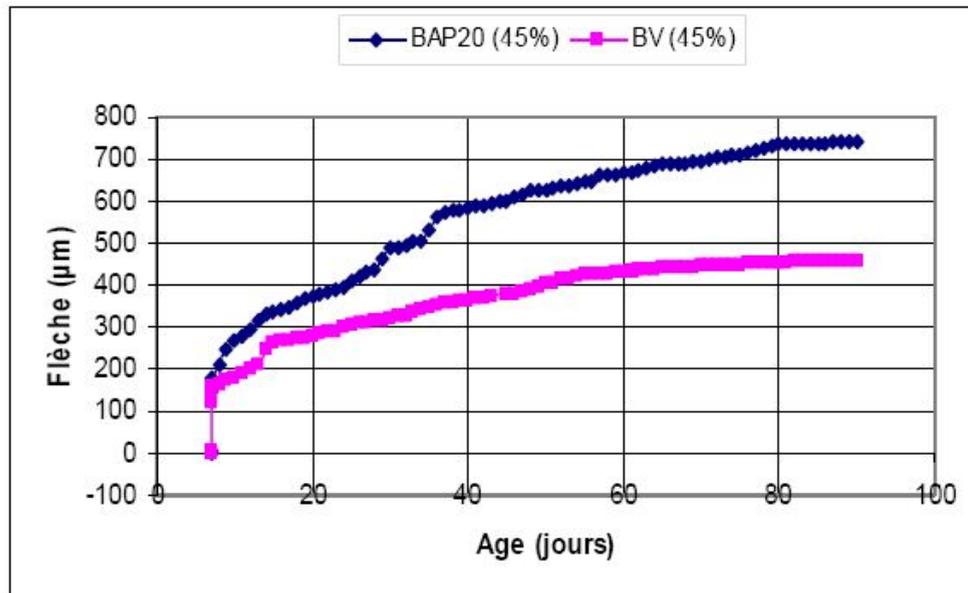


Figure 1.21 – Fluage total. (Influence de nature du béton) [76]

1.14 Durabilité

Un ouvrage doit résister au cours du temps aux diverses agressions ou sollicitations (physiques, mécaniques, chimiques...), c'est-à-dire aux charges auxquelles il est soumis, ainsi qu'aux actions diverses telles que le vent, la pluie, le froid, la chaleur, le milieu ambiant... tout en conservant son esthétique. Il doit satisfaire, sans perdre ses performances, aux besoins des utilisateurs au cours du temps.

Il devient possible de définir des objectifs de durabilité et de choisir avec précision les caractéristiques du béton en fonction de l'agressivité du milieu dans lequel se trouve l'ouvrage et d'optimiser ses caractéristiques afin de les adapter à la durée d'utilisation souhaitée. Les spécifications concernent la nature et le dosage minimal en ciment, la compacité minimale, la valeur maximale du rapport Eau/Ciment, l'enrobage minimal des armatures et la teneur maximale en chlorures dans le béton.

Malgré les aspects intéressants que proposent les bétons autoplaçants, en particulier à l'état frais, et leur utilisation en constante augmentation, ils ne disposent pas encore du recul nécessaire et suffisant pour être acceptés par tous les maîtres d'ouvrage et maîtres d'œuvre, ce qui limite encore leur diffusion [64].

Pour encourager l'utilisation des bétons autoplaçants, plusieurs études sur les différents aspects de la durabilité des bétons autoplaçants comme la perméabilité à l'oxygène [79,80],

la diffusion des ions chlore [81–83], la carbonatation accélérée [84, 85], l’attaque sulfatique externe [86], ont été menées depuis quelques années.

1.14.1 L’attaque sulfatique

Les phénomènes à l’origine de l’attaque sulfatique ne sont pas parfaitement bien connus ni maîtrisés. L’attaque sulfatique est associée à la précipitation de produits sulfates secondaires, d’une expansion importante et de la détérioration chimio-mécanique (modifications des propriétés de transport de la porosité, fissures, perte de résistance et de cohésion,...). Ceci peut conduire à la ruine du matériau cimentaire, à plus ou moins long terme en fonction de l’attaque (nature, teneur et concentration des sulfates au contact) et du ciment utilisé (type et rapport Eau/Ciment).

On distingue l’attaque sulfatique interne [87, 88], qui fait intervenir des sulfates déjà présents dans le béton (DEF), de l’attaque sulfatique externe qui se produit dès lors que les conditions externes sont réunies.

1.14.1.1 Complexité du phénomène

Les mécanismes fondamentaux d’altération des bétons par réactions chimiques, ainsi que leurs effets ont été représentés par la figure 1.22 à l’aide d’un schéma proposé par Mehta [89]. Ce schéma a été simplifié par Planel pour se focaliser sur l’attaque sulfatique [90]. Deux réactions y figurent, l’hydrolyse des hydrates de la pâte de ciment durci et les réactions entraînant la formation des produits expansifs (associés à l’Attaque au Sulfate de Sodium : ASSO). Néanmoins, les conséquences macroscopiques sont d’ordre mécanique : chute de résistance et de rigidité, fissuration et déformation du matériau et d’ordre physico-chimique : perte de résistance, modification de la porosité et des propriétés de transport et formation d’un hydrate expansif.

L’attaque sulfatique externe se produit lorsqu’un matériau cimentaire se trouve en contact direct avec une source de sulfate, comme dans les sols, les eaux souterraines, les eaux d’infiltration, les pluies acides (acide sulfurique) liées à la pollution industrielle atmosphérique. Elle peut être décrite selon trois processus permettant d’évaluer l’agression :

- Le transfert dans le milieu poreux des ions sulfates qui est contrôlé par la perméabilité et la diffusivité des matériaux ;
- Les réactions chimiques entre les composants de la pâte de ciment, qui dépendent du ciment utilisé, et de l’apport en ions SO_4^{2-} ;

– Le phénomène d’expansion, résultant de la cristallisation de nouveaux hydrates.
 La quantité de sulfates pouvant intervenir dans les réactions dépend de chaque source considérée : lieu, quantité, type.

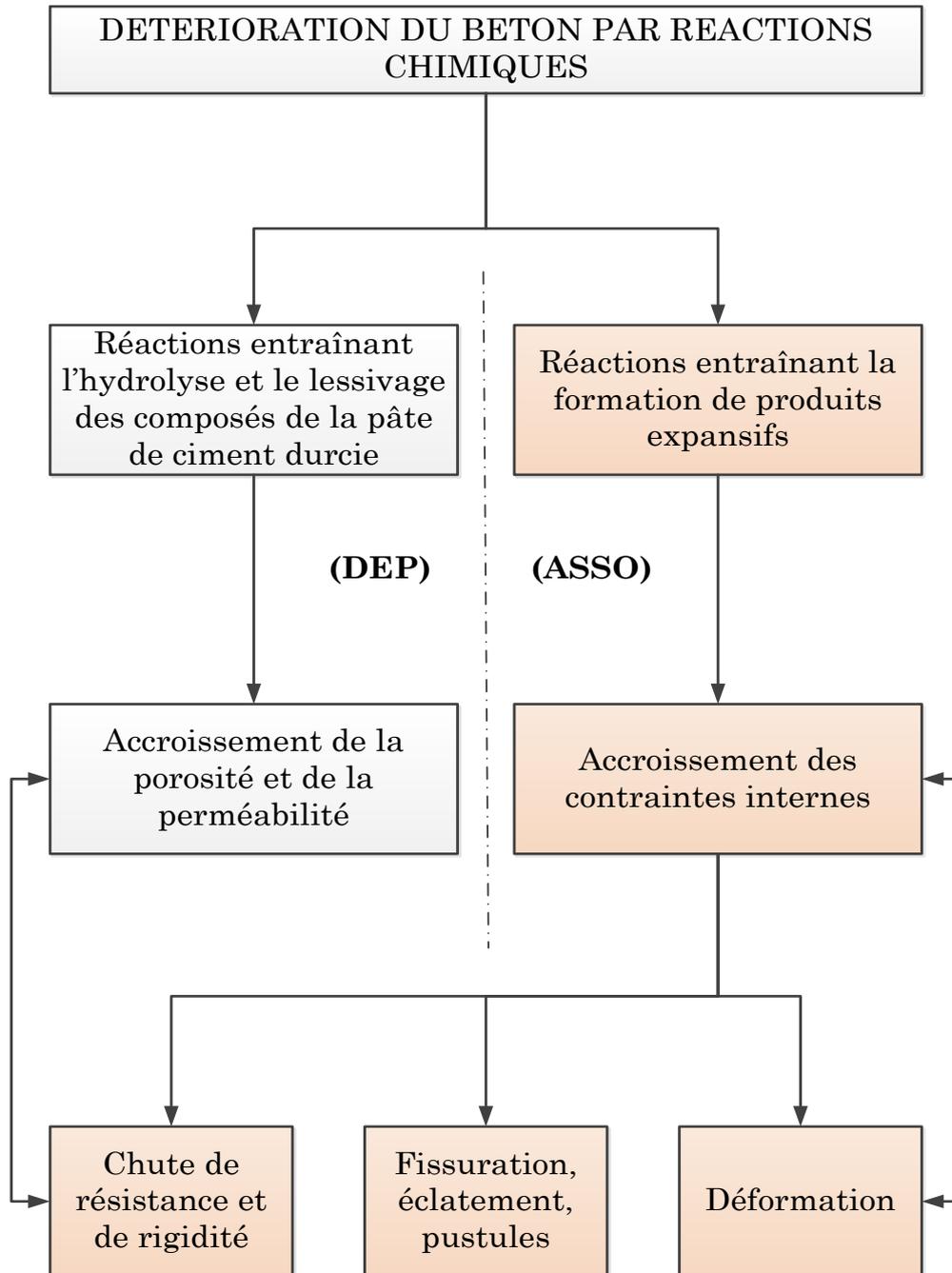


Figure 1.22 – Schéma simplifié des processus de détérioration du béton intervenant lors des attaques sulfatiques (DEP : Détérioration en Eau Pure, ASSO : Attaque au Sulfate de Sodium Na_2SO_4) [89]

L'intensité du mécanisme de l'expansion sulfatique dépendra :

- De la qualité du béton à savoir la composition du ciment, le mode de fabrication, la cure, l'état d'endommagement du béton avant l'attaque ;
- De l'exposition sur le site à savoir la concentration en SO_4^{2-} et sa distribution dans le sol, l'humidité, les opportunités de transport ;
- Des conditions environnementales et atmosphériques a savoir les changements d'humidité, la fréquence des intempéries, la température, la surface exposée [91].

1.14.1.2 Principales techniques expérimentales

Les techniques d'analyse utilisées dans le cadre d'une étude de la durabilité des bétons peuvent être divisées en deux catégories : macroscopiques et microscopiques.

a/ Techniques macroscopiques

- Variation de la masse : un gonflement se traduit par un gain de masse tandis qu'une perte de matière par ruine fait chuter brutalement la masse ;
- La mesure de l'allongement (expansion) : c'est le paramètre qui démontre sans équivoque l'existence d'un gonflement. N'est mesurable que sur les échantillons équipés de plots, c'est-à-dire les mortiers ;
- Mesure de la vitesse de propagation du son : permet d'évaluer de manière non destructive l'évolution des propriétés mécaniques du béton puisque la vitesse est corrélée au module dynamique. Une chute du module dynamique traduit un endommagement global du béton ;
- Porosité à l'eau : c'est le premier paramètre qui gouverne la résistance et la perméabilité des bétons. Cette mesure permet donc d'identifier a priori les bétons les plus durables ;
- La mesure de la résistance à la compression et à la traction : mesure les propriétés mécaniques des bétons et des mortiers, notamment leur évolution au cours de l'exposition à l'environnement agressif ;
- Contrôle visuel de la fissuration : évalue le degré d'endommagement de l'échantillon teste, aide au diagnostic de l'altération [90].

b/ Techniques microscopiques

- La microscopie électronique a balayage (MEB) avec microsonde EDS : identifie les modifications de la microstructure et de la microtexture des bétons et des mortiers. Cet outil permet de réaliser le diagnostic de l'altération ;
- Analyse thermogravimétrique (ATG) : mesure quantitative des composants majeurs des matériaux ;

- La diffraction aux rayons X (DRX) : L'analyse des différents minéraux qui composent les bétons La DRX reste assez limitée en quantitative, elle permet d'identifier les phases bien cristallisées comme la portlandite, le monosulfoaluminate, le gypse, l'ettringite non colloïdale et d'autres phases minérales hydratées de la pâte de ciment.

1.14.2 Perméabilité A L'oxygène

La perméabilité aux gaz est une propriété de transfert qui est fréquemment utilisée pour caractériser la durabilité du béton. Ainsi, la mesure de la perméabilité à l'oxygène est une mesure fiable, relativement simple et utilisable pour le simple classement des bétons ou encore pour une évaluation de leur durabilité potentielle.

Cependant, la mesure de perméabilité à l'oxygène dépend de la pression d'essai et du taux de saturation de l'échantillon. Pour caractériser un matériau indépendamment du premier facteur, il est nécessaire d'utiliser une caractéristique appelée perméabilité intrinsèque. Cette grandeur correspond à l'ordonnée à l'origine de la courbe représentant la perméabilité en fonction de l'inverse de la pression d'essai. Pour s'affranchir du deuxième facteur (taux de saturation), il faut évaluer cette caractéristique pour un matériau sec ce qui conduit à étudier la «perméabilité intrinsèque sèche» de chaque composition. Cet état de saturation du matériau n'est pas représentatif de la réalité (et donne des perméabilités plus importantes) mais permet d'étudier une propriété intrinsèque du béton et de la comparer pour différentes formulations [64].

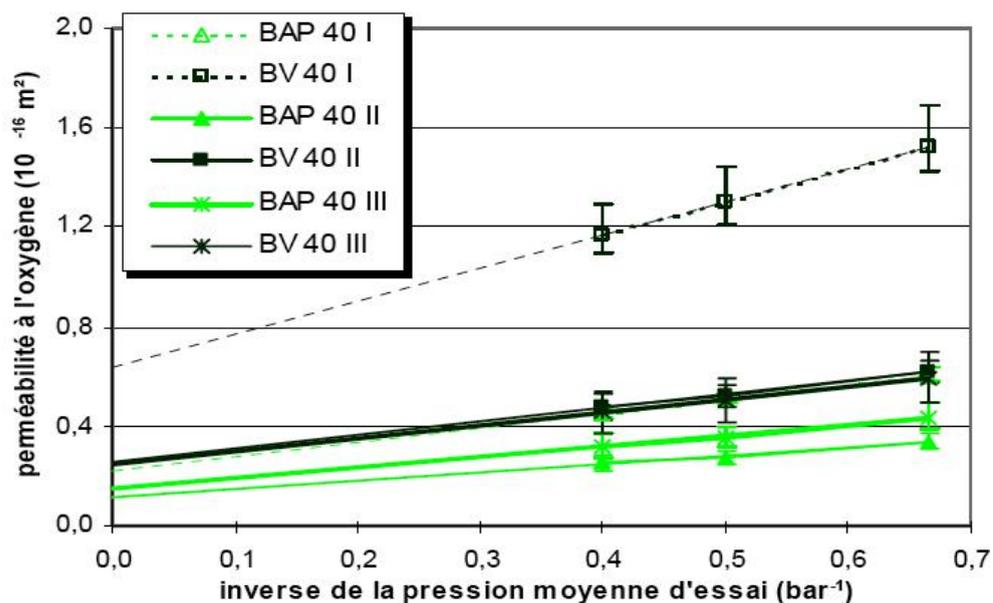


Figure 1.23 – Perméabilité à l'état sec des bétons d'ouvrage

Assié [64] a constaté que la perméabilité à l'oxygène se révèle deux fois moins importante

pour les BAP que pour les bétons vibrés. La perméabilité intrinsèque à l'état sec est donc également moins importante pour les BAP que pour les bétons vibrés alors que le coefficient de Klinkenberg est plus élevé pour les BAP (cf. Figure 1.23).

1.14.3 Diffusion des ions chlore

La diffusion est le résultat d'un transfert de matière, à travers le béton, dû à un gradient de concentration (diffusion moléculaire). Les mouvements de fluides, liquides ou gaz, qui en découlent sont très influencés par le taux de saturation du matériau. Comme pour la perméabilité, l'eau contenue dans les pores ralentit la diffusion des gaz de manière significative. Cette solution interstitielle véhicule également des ions, dont certains sont de nature agressive comme les chlorures et les sulfates. De plus, des interactions chimiques peuvent avoir lieu avec la pâte de ciment à l'intérieur des pores : à la diffusion moléculaire vient se joindre la diffusion ionique. Celle-ci est plus présente lorsque le matériau est saturé et joue un rôle important dans l'attaque du béton par ces agents agressifs. La diffusion varie elle aussi avec le rapport E/C mais l'influence de ce dernier sur la diffusion est bien moindre que sur la perméabilité.

L'agent agressif extérieur dont la diffusion à travers le béton est particulièrement intéressante est celle des ions chlore qui peuvent provenir de diverses sources extérieures (sels fondants, eau de mer, nappe phréatique, eaux industrielles) et pénétrer dans le béton par diffusion (et/ou absorption). Lorsque ceux-ci se retrouvent en quantité suffisante (concentration minimale) dans l'eau interstitielle du béton ils engendrent une diminution du pH. Au voisinage des armatures en acier, cette diminution de pH détruit progressivement la couche protectrice (basique) des armatures. Il y a dépassivation de l'acier et le phénomène de corrosion peut alors commencer. Dans ce cas de figure, la durabilité du béton armé dépend fortement de la résistance du béton à la pénétration de ces agents agressifs (même s'ils ne dégradent pratiquement pas le béton lui-même).

Les différentes comparaisons publiées sur la diffusion des ions chlore entre les BAP et les bétons ne permettent pas d'en déduire une tendance générale.

Certains auteurs [22] ont évalué le comportement de bétons autoplaçants et de bétons vibrés soumis à un essai de migration des ions chlore sous un champ électrique. Malgré un rapport E/C plus faible (0,4 contre 0,5 pour le béton vibré), le BAP s'est avéré moins résistant à la migration des ions chlore. Les coefficients de diffusion du BAP, calculés à partir de ces essais, sont 2 à 3 fois supérieurs à ceux du béton vibré (31 à $56 \cdot 10^{-12} \text{m}^2/\text{s}$ au lieu de 15 à $18 \cdot 10^{-12} \text{m}^2/\text{s}$, cf. Figure 1.24). Selon ces auteurs, ces faibles performances pourraient être attribuées à une mauvaise dispersion de l'addition calcaire.

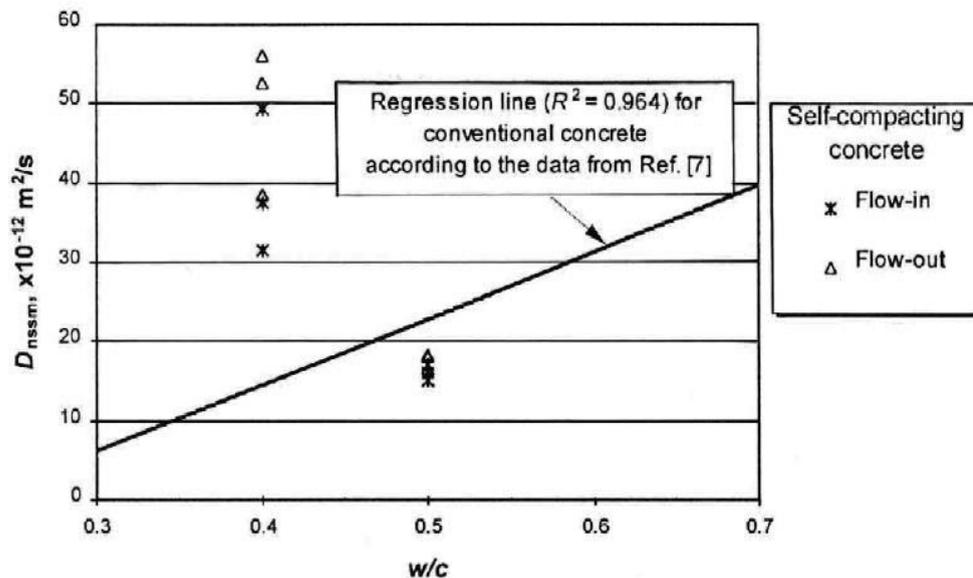


Figure 1.24 – Comparaison des coefficients de diffusion des ions chlore entre BAP et bétons vibrés [22]

1.14.4 Carbonatation

Bien que généralement supposé inerte vis-à-vis du béton, l'air ambiant contient du dioxyde de carbone qui peut réagir avec le ciment hydraté. Lorsque le dioxyde de carbone diffuse à l'intérieur du béton, en présence d'eau, il réagit en premier lieu avec la portlandite (ou chaux hydratée, $\text{Ca}(\text{OH})_2$) pour former du carbonate de calcium (ou calcite, CaCO_3) selon la réaction suivante :



L'un des effets de cette réaction est le retrait de carbonatation [92,93]. En ce qui concerne la durabilité, l'importance de la carbonatation réside dans le fait que, par suite de ces transformations, le pH de la solution interstitielle diminue et devient inférieur à dix. Si ce front de carbonatation progresse jusqu'à la surface des armatures, la couche protectrice de passivation des aciers (nécessitant un pH élevé) est dissoute et la corrosion des armatures peut se produire, à condition que l'oxygène et l'humidité nécessaires soient présents. Le dioxyde de carbone (l'acide carbonique, en fait) réagit aussi avec les autres hydrates tels que les aluminates et les silicates de calcium hydratés (C-S-H). Autrement dit, les principaux constituants du ciment sont sujets à la carbonatation (cf. Figure 1.25).

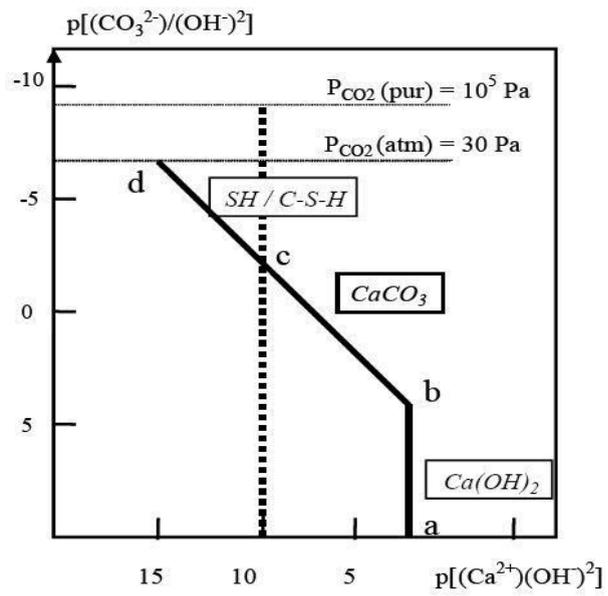


Figure 1.25 – Diagramme des équilibres thermodynamiques à 20 °C des phases hydratées du ciment avec le CO₂ [94]

SYNTHÈSE BIBLIOGRAPHIQUE

Cette étude bibliographique a été effectuée d'une part pour faire le point des travaux de recherche sur les mortiers et bétons autoplacants et d'autre part pour maîtriser la présente étude en effectuant un travail lié directement à la bibliographie.

Cette recherche bibliographique a suscité l'intérêt de l'incorporation des additions minérales dans l'amélioration des performances des mortiers et bétons autoplacants. Du fait que très peu de travaux ont été axés sur l'effet de la pouzzolane seule ou la combinaison avec la poudre de marbre, notre travail se penchera essentiellement sur cet aspect et sur l'influence de ces deux additions minérales typiquement locales sur les propriétés rhéologiques, mécanique et de durabilité.

Nous nous sommes intéressés aux caractéristiques de conception et de réalisation des BAP, ainsi que le comportement rhéologique des BAP et les techniques utilisées pour évaluer cet comportement. A cela, il faut ajouter l'étude de l'effet des additions minérales sur le comportement à l'état frais et à l'état durci des BAP.

Le BAP est un béton très fluide, dont la spécificité est de se mettre en place sans vibration, sous le seul effet de son poids propre. Son utilisation contribue à améliorer les conditions de travail sur chantier.

Les BAP se composent d'un grand volume de pâte riche en fines associée à une faible proportion de granulats dont la fluidité est améliorée par l'utilisation de superplastifiants et éventuellement d'agent de viscosité. A l'état durci, les propriétés mécaniques et physico-chimiques sont influencées par la composition. L'ajout de l'addition minérale améliore la distribution des tailles de pores ce qui conduit à une densification de la microstructure.

De point de vue mécanique l'emploi des additions minérales multiplie le site de nucléation améliorant la résistance au jeune âge. A long terme, le comportement mécanique peut être comparé aux BV.

CHAPITRE 2

CARACTÉRISATIONS DES MATÉRIAUX ET PROCÉDURES EXPÉRIMENTALES

2.1 Introduction

Dans le présent chapitre, nous allons présenter les différents essais de caractérisation des matériaux nécessaires ainsi que la méthode de formulation adoptée et les résultats obtenus. Par la suite, on présentera quelques essais relatifs au mortier afin de pouvoir fixer les dosages en sable et en superplastifiant. La formulation adoptée est modifiée de telle manière que les matériaux locaux puissent donner un bon mortier autoplaçant et un bon béton autoplaçant.

Ensuite une série d'essais est réalisée sur le béton à l'état frais afin de pouvoir étudier l'ouvrabilité et la rhéologie du béton. Cette série est suivie par des essais sur le béton durci pour déterminer les résistances mécaniques des mélanges à l'état durci. On notera que tous les essais mentionnés ci-dessous ont été réalisés au laboratoire de recherche en génie civil à l'Université Amar Telidji à Laghouat et le Laboratoire de mécanique et matériaux de génie civil à l'Université de Cergy Pontoise en France. Une série d'essais sur la durabilité du béton vis à vis des attaques aux sulfates et les attaques aux acides est aussi présentée.

2.2 Méthodes d'essais

2.2.1 Essais sur granulats

2.2.1.1 Analyse granulométrique par tamisage

L'analyse granulométrique a été réalisé selon la norme NF EN 933-1. Les courbes granulométriques des différents granulats sont données dans la Figure 2.1.

A partir de l'analyse granulométrique on peut déterminer les caractéristiques des granulats et en particulier le module de finesse de sable alluvionnaire qui est défini comme le 1/100 de la somme des refus exprimés en pourcentage sur les différents tamis de la série suivante : 0.16 ; 0.315 ; 0.63 ; 1.25 ; 2.5 ; 5 (mm).

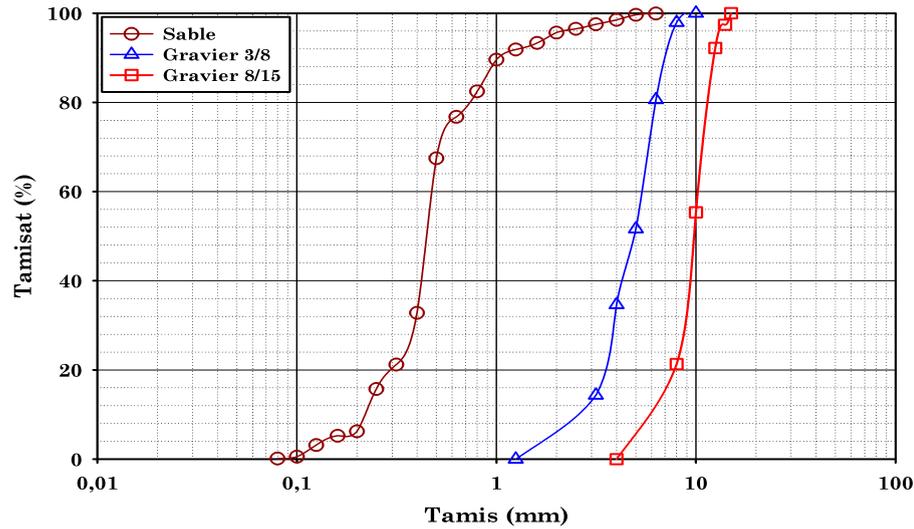


Figure 2.1 – Analyse granulométrique

2.2.1.2 Caractéristiques physiques des granulats

Equivalent de sable

L'équivalent de sable a été réalisé conformément à la norme NF P 18-598 : Cet essai consiste à plonger une masse définie de sable dans une éprouvette normalisée remplie par une solution lavante, après agitation, on laisse décanter le mélange pendant 20 minutes, ensuite on mesure la hauteur du sédiment (H_1) et du sédiment + flocculant (H_2). L'équivalent de sable est donné par la relation suivante :

$$E_s = \frac{H_1}{H_2} \cdot 100 \quad (2.1)$$

L'équivalent de sable est d'autant plus élevé que la teneur en argile est faible.

si $70 \leq E_s < 80$ le sable est propre et à faible pourcentage de fines argileuses convenant parfaitement pour les bétons de haute qualité.

Coefficient de Los Angeles

Los Angeles du gravier a été réalisé conformément à la norme NF P 18-573. Cet essai a pour but de mesurer la quantité d'éléments inférieurs à 1.6 mm produite par fragmentation, après soumission du matériau à des chocs de boulets à l'intérieur d'un cylindre en rotation. L'essai consiste à introduire dans la machine Los Angeles 5000 g de gravier et la charge de boulets de la classe granulaire choisie. Après 500 rotations de machine, à une vitesse régulière comprise entre 30 et 33 tr/min, le granulat est recueilli et le tamisé à 1.6 mm. Le passant au tamis de 1.6 mm est $P = 5000 - m$.

avec m : masse des refus.

Par définition, le coefficient Los Angeles est le rapport :

$$L_A = \frac{m}{M} \cdot 100 \quad (2.2)$$

si $L_A \leq 15$; le gravier est considéré comme bon.

Masses volumiques

Les masses volumiques ont été mesurées selon la norme NFP 18-555.

La masse volumique apparente est la masse de l'unité de volume du matériau à l'état naturel. Elle est donnée par :

$$\rho_{ap} = \frac{M_t - M_r}{V_{ap}} \quad (2.3)$$

M_t : masse totale (matériaux avec le récipient).

M_r : masse du récipient.

V_{ap} : volume du récipient.

La masse volumique d'un ensemble de grains est fortement influencée par la composition granulométrique, la forme des grains, le degré de tassement ainsi que la teneur en eau lorsque les grains sont petits.

La masse volumique absolue a été déterminé par la méthode du pycnomètre, est donné par :

$$\rho_{abs} = \frac{(M_2 - M_1)}{(M_4 + M_2 - M_1 - M_3)} \rho_{eau} \quad (2.4)$$

avec :

M_1 : masse de pycnomètre vide.

M_2 : masse d'échantillon et le pycnomètre.

M_3 : masse d'échantillon et le pycnomètre rempli d'eau.

M_4 : masse de pycnomètre rempli d'eau.

Teneur en eau

La teneur en eau de matériaux (ω) est calculée par la formule suivante :

$$\omega = \frac{M_h - M_s}{M_s} \cdot 100 \quad (2.5)$$

M_s : est la masse sèche d'échantillon (après l'étuvage)

M_h : est la masse humide d'échantillon.

La teneur en eau des matériaux dépend de beaucoup des facteurs, surtout de l'atmosphère où ils sont stockés, le vent, la température et de la porosité du matériau.

Le coefficient d'absorption d'eau est défini comme le rapport de l'augmentation de masse de l'échantillon entraînée par une imbibition partielle en eau, à la masse sèche de l'échantillon. Cette imbibition partielle est obtenue par immersion de l'échantillon dans l'eau pendant 24 heures à 20 °C à la pression atmosphérique.

Pour le sable il faut utilisé le cône et le piston pour déterminer le coefficient d'absorption du sable, A_b est déterminé par la formule suivante :

$$A_b = \frac{M_h - M_s}{M_s} \cdot 100 \quad (2.6)$$

M_h : masse à l'état de saturation.

M_s : masse à l'état sec.

Le tableau 2.1 résume les caractéristiques physiques des granulats utilisées dans la partie expérimentale.

Tableau 2.1 – Caractéristiques des granulats

Caractéristiques	Unité	Sable (0/5)	Gravier (3/8)	Gravier (8/15)
Masse volumique apparente	(kg/m^3)	1544	1335	1293
Masse volumique absolue	(kg/m^3)	2612	2700	2700
Module de finesse		2,08	/	/
Coefficient d'absorption A_b	(%)	0,58	2,52	2,52
Equivalent de sable visuel E_{SV}	(%)	85	/	/
Equivalent de sable avec piston E_{SP}	(%)	89	/	/
Coefficient Los Angeles L_A	(%)	/	25,46	25,07

2.2.2 Le ciment

Le ciment utilisé est un ciment type CEM I 42,5 (ciment résistant aux sulfates CRS) fabriqué par la société ACC. La classe vraie du ciment est 42,5. La masse volumique absolue du ciment est de $3,15 g/cm^3$ et sa surface spécifique de Blaine de $3000 cm^2/g$. La composition minéralogique et chimique du ciment sont données dans les tableaux 2.2 et 2.3.

Tableau 2.2 – Caractéristiques minéralogiques du ciment

Element	Ciment
C_3S	55.9
C_2S	20.2
C_3A	2.9
C_4AF	13.6

Tableau 2.3 – Caractéristiques physiques et chimiques de ciment, pouzzolane naturelle et poudre de marbre

Composant	Ciment	Pouzzolane naturelle	Poudre de marbre
SiO_2	21,6	46,8	1,0
CaO	63,7	9,2	52,6
MgO	1,6	3,8	2,1
Al_2O_3	4,0	18,8	0,2
Fe_2O_3	4,5	10,5	0,2
SO_3	1,9	0,2	0,07
MnO	-	-	-
K_2O	-	0,5	0,04
TiO_2	-	-	0,01
Na_2O	0,03	0,8	0,06
Cl	0,018	-	-
Perte au feu	0,3	-	43,63
Densité spécifique	3,15	2,6	2,7
Finesse de monture (cm^2/g)	3000	4200	3500

2.2.3 Additions

2.2.3.1 Pouzzolane naturelle

La pouzzolane utilisée dans la formulation du béton autoplaçant est une pouzzolane finement broyée (grosseur maximal de $80 \mu m$) originaire de Bou Hamidi de la région de Béni Saf, dans l'ouest de l'Algérie. Les caractéristiques chimiques et physiques sont résumées dans le tableau 2.3. Nous avons utilisé l'appareil de micro Deval pour broyer la pouzzolane, avec une quantité des billes pesant 1 kg et 1 kg de pouzzolane à broyer pendant 12 h. Le pouzzolane broyée a une finesse de $4200 cm^2/g$.

2.2.3.2 Poudre de marbre

La poudre de marbre utilisé dans cette étude, est commercialisé par la société MCA (société de fabrication de marbre carrelage et Agglo-Marbre). Le tableau 2.3 présente les caractéristiques physiques et chimiques de la poudre de marbre utilisée dans la formulation du béton autoplaçant.

2.2.4 Superplastifiant

L'adjuvant utilisé est un superplastifiant haut réducteur d'eau fabriqué par la société Granitex et commercialisé sous le nom de MEDAFLOW 30. Il est à base d'éther polycarbox-

lique modifié. Sa plage normale d'utilisation est fixée par la fiche technique 0.5% à 2% (en extrait sec) du poids de ciment.

Il est sous forme liquide de couleur jaunâtre de 30% d'extrait sec. Sa densité est de 1.07, et son PH est de 6 à 6.5 et d'une teneur en chlore inférieure à 1 g/l.

2.2.5 L'eau de gâchage

Nous avons utilisé l'eau potable du robinet exempté d'impuretés.

2.3 Formulations adoptées

L'objectif de la formulation est de déterminer la quantité nécessaire pour chaque matériaux composant la gâchée, permettant l'obtention d'un béton ayant des propriétés souhaitées. Le paramètre important considéré dans la formulation est le rapport Eau/Liant. Lors de la formulation, la caractérisation du béton autoplaçant est nécessaire. Cela consiste à connaître son comportement à l'état frais à partir de tests mis en place. Un béton est qualifié d'autoplaçant, non pas par rapport à sa composition, mais parce qu'il possède certaines propriétés à l'état frais : la capacité de remplissage, la capacité de passage et la résistance à la ségrégation. Bouhamou et al [95] précisent que la formulation du BAP requiert une étude précise notamment dans le choix de ses constituants, et l'optimisation des paramètres influant en particulier les rapports Eau/Ciment, le rapport Addition/Ciment, le dosage en superplastifiant, le volume de pâte et le diamètre maximal des gravillons.

Les principaux tests réalisés sont expérimentaux, et ont pour objectifs de vérifier les différentes propriétés définies ci-dessus. Ils sont destinés à caractériser le béton avec les termes qualitatifs de fluidité, hétérogénéité et absence de blocage. Dans cette étude nous avons fixés comme but essentiel l'influence de la pouzzolane naturelle et la poudre de marbre, comme ajout minéral, sur les caractéristiques rhéologiques et mécaniques des bétons autoplaçants. Pour cela, on a fixé tous les autres paramètres, à savoir la quantité de sable dans le mortier donc le rapport Sable/Mortier, le rapport Eau/Liant ainsi que le pourcentage en superplastifiant par rapport au liant.

La formulation que nous avons adoptée est basée sur la formulation proposée par le japonais Okamura et appelée la méthode générale [1], avec quelques modifications concernant la sélection de la quantité de sable dans le mortier, le rapport eau/liant ainsi que le rapport superplastifiant/liant. Ces derniers ont été évalués expérimentalement de manière à avoir des valeurs de l'étalement au cône d'Abrams et du temps d'écoulement au V-Funnel

acceptables. Pour la sélection des quantités d'air et de graviers, la méthode Okamura a été maintenue.

2.3.1 Formulation du Mortier

Dans le BAP, la phase du mortier est une phase très importante car elle fournit la lubrification entre les particules des gros granulats, et la stabilité globale du béton. Pour que le mortier puisse être considéré comme autoplaçant, il doit répondre à deux exigences essentielles : présenter une fluidité élevée et une résistance suffisante aux ségrégations statique et dynamique. En terme de rhéologie, cela revient à abaisser le seuil de cisaillement du mortier, tout en maintenant la viscosité plastique du mélange. La fluidité élevée du mortier autoplaçant (MAP) peut être obtenue en ayant recours à des superplastifiants sans augmenter le rapport eau/ciment. L'ajout d'un superplastifiant peut provoquer une diminution significative du seuil de cisaillement mais n'aura qu'une influence limitée sur la viscosité plastique, tandis qu'une quantité supplémentaire d'eau peut diminuer le seuil de cisaillement et la viscosité plastique. Selon Jin et Domone [96], des tests sur les mortiers sont réalisés car :

- Le BAP a un volume en gros granulats moins important que le béton ordinaire, et donc les propriétés du mortier sont dominantes.
- L'évaluation des propriétés du mortier est une partie intégrale de la formulation des BAP, et donc la connaissance des propriétés du mortier est utile.
- Tester un mortier est beaucoup plus commode et simple que tester un béton.

Dans le BAP, la phase du mortier fournit la lubrification entre les particules des gros granulats, et la stabilité globale du béton. Les propriétés du mortier sont semblables à celles du BAP lui-même, c'est-à-dire un faible seuil de cisaillement pour assurer l'écoulement sous le seul effet de la gravité et une viscosité plastique suffisante afin d'assurer la non ségrégation du béton durant l'écoulement [97].

En l'absence d'un rhéomètre pour mesurer le seuil de cisaillement et la viscosité plastique, la fluidité du mortier a été évaluée par l'essai d'étalement et l'essai de l'entonnoir (V-funnel) qui, ont été utilisés par plusieurs chercheurs [97].

Pour la formulation du mortier autoplaçant. La sélection du rapport sable/mortier et du rapport Sp/L est ajustée par l'essai d'étalement, dont le diamètre de la galette obtenu doit être compris entre $270 \text{ mm} \leq E_t \leq 330 \text{ mm}$, et par l'essai de l'entonnoir en V (V-funnel), dont le temps d'écoulement obtenu doit être compris entre 2 et 10 secondes [97].

2.3.2 Rapport Eau/Liant (E/L)

Nous avons effectué un grand nombre d'essais préliminaires de mesure d'étalement et de temps d'écoulement afin de fixer le rapport eau/liant (E/L). Felekoglu et al [67] ont montré que le rapport E/C optimum pour produire un BAP est compris dans l'intervalle 0,84 et 1,07 en volume qui correspond à l'intervalle 0,28 et 0,45 en masse. Les rapports E/C au-dessus et en dessous de cet intervalle peuvent causer une ségrégation ou un blocage du mélange.

Les différents essais préliminaires ont montré qu'il faut aller jusqu'au rapport 0,40 afin d'avoir un mortier autoplacant satisfaisant ayant un étalement supérieur à 270 mm surtout dans le cas de faibles dosages en superplastifiants. Pour tous les essais de mortier nous avons fixé le rapport eau/liant à 0,40.

2.3.3 Rapport Sable/Mortier (S/M)

L'optimisation du rapport Sable/Mortier consiste à développer les meilleures caractéristiques du mortier à l'état frais pour assurer par la suite de bonnes caractéristiques du béton autoplacant à l'état frais et durci. Le principe de la méthode consiste à rechercher la composition optimale pour les rapports Sable/Mortier de 0,6 ; 0,5 et 0,4 tout en faisant varier le rapport superplastifiant/liant (Sp/L).

2.3.4 Variation du rapport Superplastifiant/Liant (Sp/L)

Pour déterminer l'effet de la variation de la teneur en polycarboxylate (PC) sur le mortier à l'état frais, nous avons étudié la variation du diamètre d'étalement et du temps d'écoulement à partir de l'essai de l'entonnoir en V (V-funnel), en fonction du dosage en superplastifiant polycarboxylate (PC), Sp/L variant de 0.6% à 2%.

2.3.5 Confection des mortiers

Pour la confection du mortier, les proportions du mélange (ciment, sable, eau et superplastifiant) ont été déterminées selon l'exemple de composition de mortier donné à l'annexe A.

Aiad et al [98] trouvent que le retard dans l'addition du superplastifiant améliore la rhéologie du mélange. Pour eux le temps optimal pour introduire le superplastifiant est de 10 minutes après l'addition d'eau au mélange. Par contre Domone et Jin [97] proposent l'introduction du superplastifiant à partir de la deuxième minute après le commencement

du malaxage. Dans nos essais nous avons opté pour la dernière méthode. La séquence de malaxage adopté pour tous les mélange est la suivante :

- Mélanger à sec le ciment et le sable pendant environ une (1) minute afin d’homogénéiser le mélange (on a utilisé un malaxeur à mortier de 5 litres de capacité)
- Malaxer pendant une (1) minute avec la première quantité d’eau (Eau 1 = 70% Eau)
- Malaxer pendant une (1) minute avec le restant de l’eau de gâchage (Eau 2 = 30% Eau) mélangé avec le superplastifiant
- Malaxer le mélange pendant 3 minutes.

La séquence de malaxage du mortier est mentionnée sur la Figure 2.2.

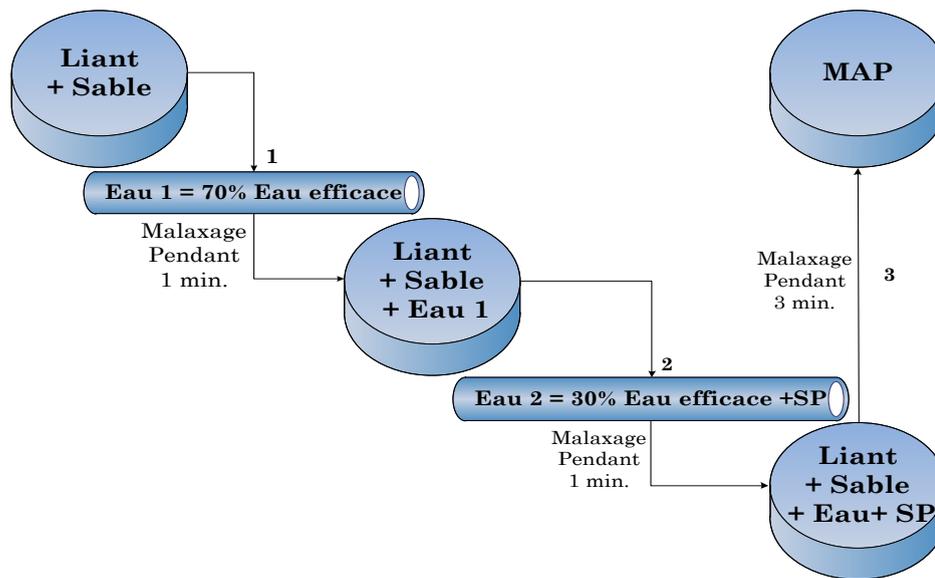


Figure 2.2 – Séquence de malaxage lors de l’élaboration du mortier [97]

2.4 Formulation du BAP de référence

En suivant la procédure d’exécution de la méthode générale, on remarque que l’étape de préparation du mortier est une étape primordiale car elle permet de fixer les rapports E/L (Eau/Liant), S/M (Sable/Mortier) ainsi que Sp/L (Superplastifiant/Liant). Du moment que le mortier, dans les bétons autoplaçants, occupe un volume important dans le mélange, les résultats des essais sur mortier seront alors concluants. En se basant sur les résultats des essais sur mortier on procède à l’élaboration du BAP de référence (0% fillers). Les rapports E/L et Sp/L seront ajustés afin d’aboutir aux résultats adéquats pour un bon étalement sans ségrégation ni ressuage.

Une fois que les rapports seront déterminés, on procède aux différents essais sur béton frais et sur béton durci. Pour la confection du béton autoplaçant, les proportions du mélange (ciment, gravier, sable, eau et superplastifiant) sont calculés d’après l’exemple

de composition du béton donné à l'annexe C.

2.4.1 Fixation des rapports Sable/Mortier et Eau/Liant

Afin de minimiser le nombre de variables pour le béton autoplaçant de référence, nous avons jugé judicieux de maintenir fixe les deux rapports S/M et E/L trouvés lors des essais effectués sur le mortier, et chercher la meilleure formulation du BAP de référence en ajustant le rapport Sp/L.

2.4.2 Fixation du rapport Superplastifiant/Liant

Comme point de départ, on prend le résultat des essais sur mortiers, du rapport Sp/L. Il suffit de quelques mesures d'étalement (au cône d'Abrams) et de temps d'écoulement a l'entonnoir en V, pour trouver le meilleur rapport Sp/L donnant un bon béton autoplaçant sans ségrégation ni ressuage. Une fois que le BAP de référence est obtenu, pour les autres BAP, on commence par substituer une partie du ciment par la pouzzolane naturelle (PZ) et la poudre de marbre (MP).

2.4.3 Confection des bétons autoplaçants

Comme tendance générale, pour un faible rapport eau/liant et un fort dosage en superplastifiant, le mélange nécessite un temps de malaxage plus prolongé [99]. Un malaxage intensif disperse mieux les particules de poudres. Dans le cas de mauvais malaxage ces particules de poudres restent dans la phase pâte et rendent le béton plus visqueux [100]. De Larrard et al [101] ont montré que l'étalement et la résistance à la compression sont les plus influencés par le temps de malaxage. Le superplastifiant est plus efficace lorsqu'il est ajouté après l'humidification du béton (environ 70% de l'éau de gâchage). La séquence de malaxage et la composition du béton ont un rôle important pour avoir une hydratation correcte, ce qui conduit à avoir un béton performant et durable. Les mélanges ont été confectionnés dans un malaxeur traditionnel d'une capacité de 80 litres.

La procédure de malaxage adoptée est celle proposée par Domone et Jin (cf. Figure 2.3).

- Calculer l'eau efficace que l'on introduit dans le malaxeur en prenant en compte la teneur en eau et l'absorption des granulats ainsi que l'eau contenue dans l'adjuvant.

La quantité d'eau efficace est donnée par la formule suivante ;

$$E_{eff} = E_{totale} - E_{teneur\ en\ eau} - E_{adjuvant} + E_{absorber} \quad (2.7)$$

E_{eff} : Eau efficace quand mais dans le malaxeur ;

E_{totale} : Eau théorique ;

$E_{teneur\ en\ eau}$: Eau présent sur la surface des granulats ;

$E_{adjuvant}$: Eau dans l'adjuvant ;

$E_{absorber}$: Eau absorber par les granulats.

(cf. Annexe C)

- Calculer les proportions du ciment, sable, gravier 3/8, gravier 8/15 et superplastifiant ;
- Malaxer le sable, ciment, fillers et gravier (3/8 et 8/15) pendant 30 secondes pour homogénéiser le mélange ;
- Ajouter pendant 1 minute la première quantité d'eau ($Eau_1 = 70\%$ Eau) ;
- Ajouter le superplastifiant dilué dans le restant de l'eau de gâchage ($Eau_2 = 30\%$ Eau) ;
- Malaxer pendant 5 minutes ;
- Arrêter le malaxeur et laisser le mélange au repos pendant 2 minutes ;
- Remalaxer pendant 30 secondes ;

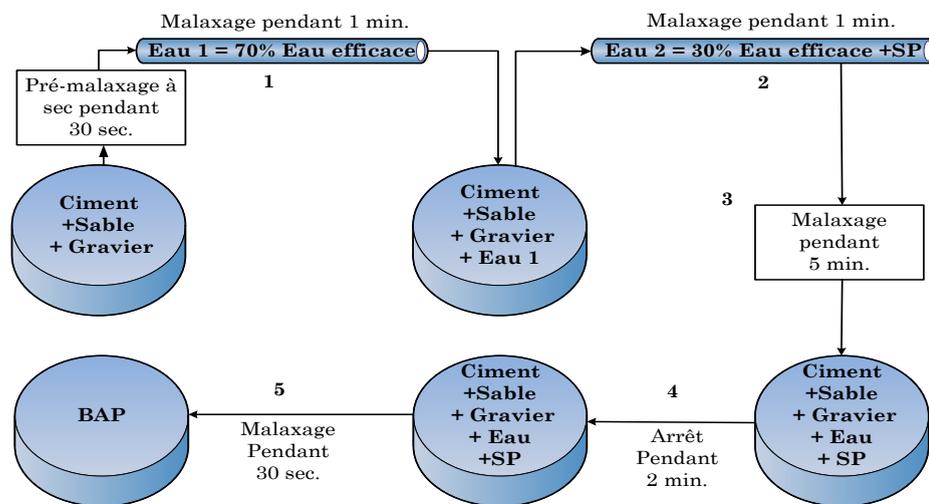


Figure 2.3 – Séquence de malaxage du béton autoplaçant [97]

Cette séquence de malaxage est la même pour tous les mélange de bétons. En ce qui concerne le remalaxage il se fait juste avant chaque essai.

2.5 Essais relatifs au mortier à l'état frais

2.5.1 Essai d'étalement au Mini-Cône

L'essai d'étalement consiste à remplir un moule tronconique placé sur une surface horizontale lisse, une fois le moule soulevé, le diamètre d'étalement du mortier est mesuré suivant deux directions perpendiculaire, la moyenne est retenu. La figure 2.4 montre le

dispositif de l'essai d'étalement pour les mortiers.

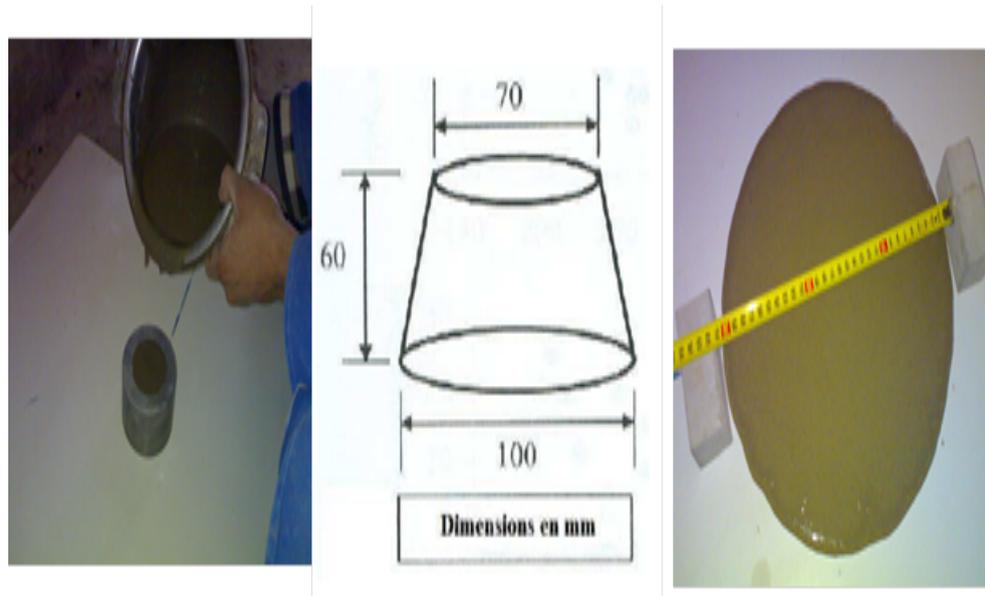


Figure 2.4 – Essai d'étalement pour mortier

2.5.2 Essai à l'entonnoir en V (V-Funnel test)

Dans l'essai de l'entonnoir en V (V-funnel), l'entonnoir est rempli de mortier (1,1 litre). Le temps d'écoulement est calculé entre l'instant de l'ouverture de l'orifice de l'entonnoir et l'instant de l'apparition de la première lumière en regardant verticalement vers le bas de l'entonnoir (cf. Figure 2.5).

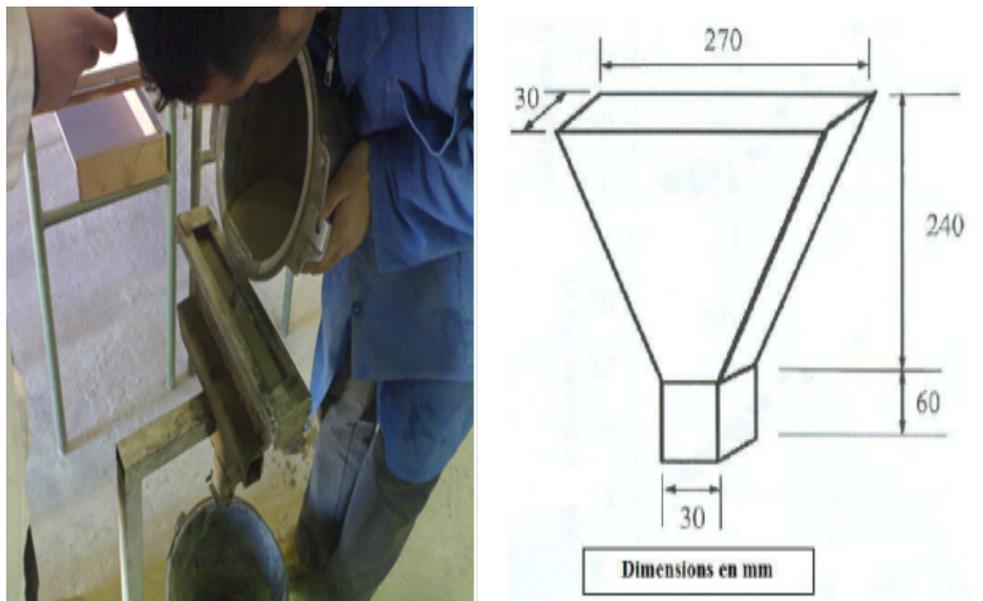


Figure 2.5 – Essai à l'entonnoir en V pour mortier

Okamura et al [1], ont proposé, d'après des expériences réalisées avec des matériaux japonais, que l'obtention simultanée d'une valeur d'étalement comprise entre 270 et 330

mm donne un mortier autoplaçant. Quand Chai [102], qui a travaillé avec des matériaux anglais, a suggéré une valeur d'étalement minimale de 300 mm et un temps d'écoulement compris entre 2 et 10 sec.

2.6 Essais relatifs au BAP à l'état frais

2.6.1 Essai d'étalement (Slump Flow test)

L'essai d'étalement peut être utilisé pour évaluer la capacité de remplissage à l'état libre en l'absence d'obstacles. Cet essai permet de déterminer l'habilité du béton à se déformer sous son poids propre. C'est l'essai type pour évaluer la déformabilité libre du béton autoplaçant [103].

L'essai d'étalement est effectué à l'aide d'un cône d'Abrams. Ce dernier est un cône sans fond, dont le diamètre de base inférieur est de 200 mm, le diamètre de base supérieur est de 100 mm, et une hauteur de 300 mm. Le cône d'Abrams est habituellement utilisé pour caractériser les bétons conventionnels par une mesure d'affaissement. Dans le cas des bétons autoplaçants, l'essai de l'affaissement au cône d'Abrams n'est pas significatif car ces bétons sont trop fluides. On utilise donc une mesure de l'étalement. Le principe de l'essai reste cependant le même. On remplit le cône de l'échantillon du béton à tester, puis on soulève le cône lentement pour permettre au béton de s'étaler. Cette opération de soulèvement du cône doit durer 5 secondes environ. On mesure ensuite la taille de la galette de béton obtenue (cf. Figure 2.6).



Figure 2.6 – Mesure du diamètre d'étalement

La dimension de la galette correspond à la moyenne de deux diamètres mesurés. A cause de la nature visqueuse du BAP, les lectures des mesures d'étalement doivent se faire après stabilité de la galette, soit environ 60 secondes après soulèvement du cône [103]. Selon EFNARC [104], la mesure de l'étalement au cône d'Abrams, peut être divisée en

trois (03) classes. Le tableau 3.11 définit ces trois classes selon le domaine d'utilisation du BAP :

Tableau 2.4 – Classes des BAP selon l'étalement et le domaine d'utilisation [104]

Classe	Etalement (en mm)	Domaine d'utilisation du BAP
SF1	550-650	- Structure non ou peu ferraillées. béton coulé à partir du haut (ex. les dalles)
		- Coulage par système de pompage du BAP (ex. tunnels)
		- Petites sections (ex. les piles et les fondations profondes)
SF2	660-750	- La majorité des applications
SF3	760-850	- Application verticales
		- Structures trop ferraillées
		- Coulage à partir du dessous du coffrage
		- Structures de forme complexe.

La classe SF3 est typiquement produite avec les petites dimensions maximales de granulats ($D_{max} < 16$ mm), et donne généralement une meilleure finition de surface que la classe SF2, mais la résistance à la ségrégation est difficile à contrôler. Des valeurs d'étalement dépassant les 850 mm peuvent être spécifiées pour des cas spéciaux mais une grande attention doit être faite quant à la résistance à la ségrégation, et la dimension maximale des granulats doit être normalement inférieure à 12 mm.

Avec le même essai, on mesure le temps d'écoulement T_{500} , qui correspond au temps mesuré, à partir du commencement de l'étalement de la galette jusqu'à atteindre un diamètre de 500 mm. Ce temps d'écoulement T_{500} peut donner des informations concernant l'uniformité et la résistance à la ségrégation du mélange [104]. Des observations complémentaires peuvent aider à comprendre certaines propriétés à l'état frais des bétons autoplacants :

- Un ressuage peut être détecté si de l'eau est présente en grande quantité sur les bords de la galette ;
- En traçant à la truelle des lignes dans la galette, on peut vérifier si le béton se referme bien, ce qui est synonyme de bon comportement ;
- La fluidité du béton peut être évaluée en mesurant les temps de passage du béton aux diamètre 50 cm durant un écoulement au cône ;
- Une forme bombée de la galette traduit un effet de voute, ce qui peut nuire à l'homogénéité du béton.

Toutes ces indications sont plus ou moins subjectives mais aident la formulation expérimentée à effectuer certaines corrections en vue d'obtenir un béton qui correspond plus à ses attentes.

2.6.2 Essai à l'entonnoir en V (V-Funnel test)

L'essai de l'entonnoir mis en place par Okamura et Ozawa en 1995 [1] permet d'évaluer la capacité du béton à passer à travers les zones confinées grâce à la mesure du temps d'écoulement à l'entonnoir (en secondes). On remplit l'entonnoir de béton, puis on laisse reposer pendant 1 minute. L'essai consiste à observer l'écoulement du béton à travers l'entonnoir et à mesurer le temps d'écoulement entre le moment où la trappe est libre et le moment où on aperçoit le jour par l'orifice. Comme l'essai de la capacité de remplissage, l'essai de l'entonnoir en V (cf. Figure 2.7) nous renseigne sur la stabilité, c'est-à-dire s'il existe de la ségrégation, ainsi que sur la viscosité du mélange étudié. S'il y a de la ségrégation, on observera un amoncellement de granulats au goulot de l'entonnoir, ou si le mélange est trop visqueux, le temps d'écoulement du béton à travers l'entonnoir sera plus important [97].

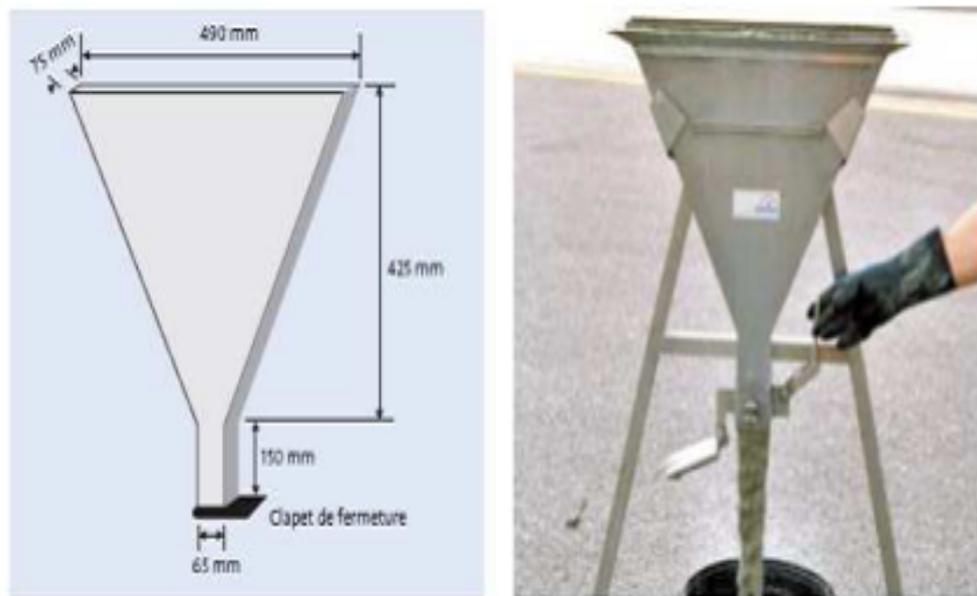


Figure 2.7 – Dispositif de l'essai d'entonnoir en V (V-Funnel)

Selon EFNARC [104] Le temps d'écoulement du béton autoplaçant à l'entonnoir doit être généralement inférieur à 12 secondes. Ils recommandent un temps compris entre 5 et 12 secondes pour obtenir un béton de viscosité suffisante.

2.6.3 Essai de J-Ring

L'essai à la couronne J ou l'étalement modifiée (J-ring) consiste à étudier, la capacité au remplissage et la capacité de passage du béton autoplaçant. Il peut aussi être utilisé pour étudier la résistance à la ségrégation d'un BAP en comparant les résultats de deux essais différents. L'essai J-ring mesure trois paramètres : l'étalement, le temps d'écoulement $T_{500,J}$ et le blocage [104].

L'essai J-ring consiste à faire écouler le béton au travers de barres d'armature afin de pouvoir évaluer sa tendance au phénomène de blocage (cf. Figure 2.8). A cet effet, le béton s'écoule à partir du cône disposé au centre d'un anneau métallique. Sur cet anneau de 300 mm de diamètre sont soudées des barres d'armature $\phi 16$ à 18 mm, espacées régulièrement d'environ deux fois et demi leur diamètre. Le béton BAP satisfait pleinement aux performances recherchées de fluidité avec faible tendance à la ségrégation et d'enrobage complet des armatures, lorsqu'il s'écoule de manière uniforme au travers de cet anneau et lorsque la répartition des granulats paraît homogène, aussi bien à l'intérieur qu'à l'extérieur de l'anneau.

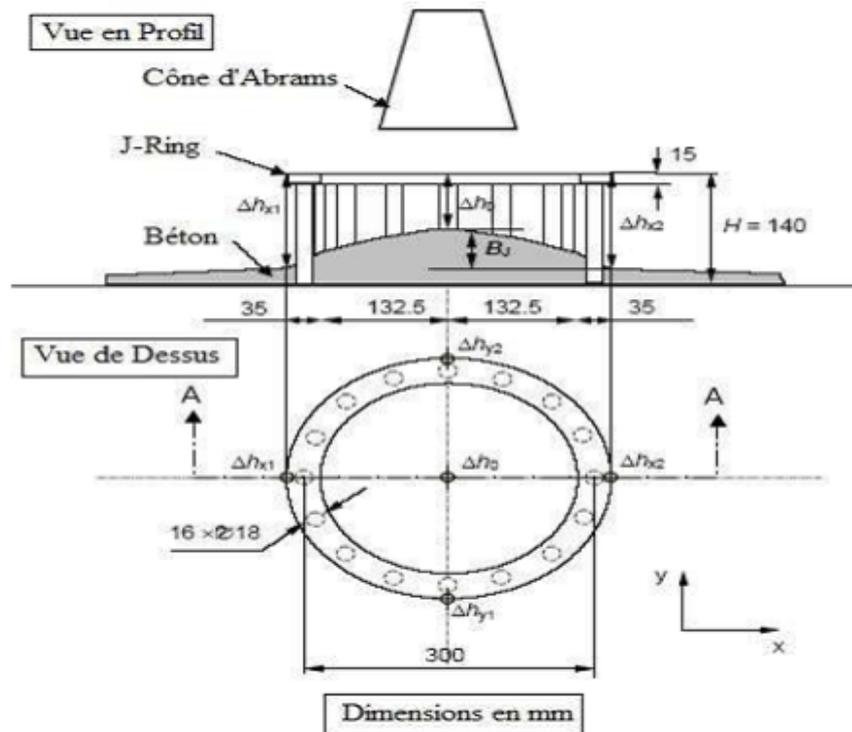


Figure 2.8 – Dimensions du J-ring et positions pour mesure de différence des hauteurs

En premier lieu on mesure le plus grand diamètre de la galette du béton autoplaçant

d_1 (cf. Figure 2.9), puis le diamètre perpendiculaire d_2 , puis on calcule l'étalement à partir de la formule suivante :

$$E_{tj} = \frac{(d_1 - d_2)}{2} \quad (2.8)$$



Figure 2.9 – Mesure d'étalement en présence du J-Ring

Le temps d'écoulement $T_{50,J}$ est la période entre le moment où le cône est soulevé et le moment où le BAP touche le cercle de diamètre 500 mm. On mesure aussi la différence des hauteurs B_J du BAP entre l'intérieur et l'extérieur du J-ring pour pouvoir confirmer ou infirmer le blocage. Les hauteurs sont montrées sur la Figure 2.10. D'après Jin et Domone [96] pour un bon BAP sans risque de blocage, la différence des hauteurs B_J ne doit pas dépasser 10 mm. B_J est calculée avec la formule suivante :

$$B_j = \left[\frac{(\Delta h_{x1} + \Delta h_{x2} + \Delta h_{y1} + \Delta h_{y2})}{4} \right] - \Delta h_0 \quad (2.9)$$



Figure 2.10 – Mesure des hauteurs à l'intérieur et à l'extérieur du J-Ring

2.6.4 Mobilité en milieu confiné

Pour caractériser la mobilité en milieu confiné, c'est-à-dire la ségrégation dynamique, aucun essai de référence n'a encore fait l'unanimité, mais les essais existants ont tous pour objectif d'évaluer la capacité du béton à s'écouler dans une zone confinée. Ils peuvent permettre de déceler des problèmes de blocage (par formation de voûtes des granulats) lors de l'écoulement.

L'essai de la boîte en L (cf. Figure 2.11) fait partie de ces essais. La partie verticale du L est remplie de béton en une seule fois. Après ouverture de la trappe, le béton s'écoule à travers un ferrailage standard (39 mm entre 3 barres $\phi 14$) qui correspond à des ouvrages très ferrillés mais qui peut être éventuellement allégé (58 mm d'espace libre entre 2 barres) (AFGC [40]).

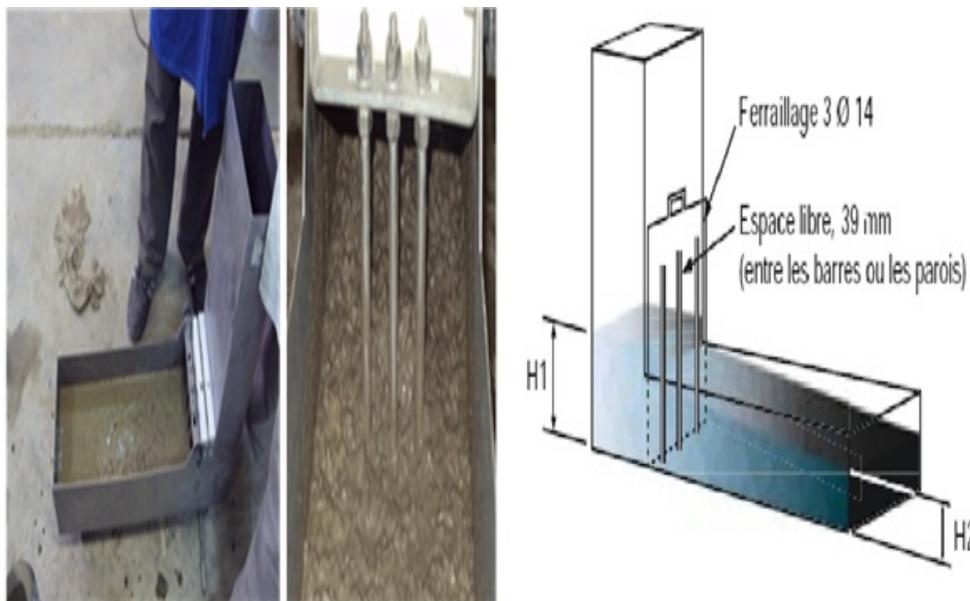


Figure 2.11 – Essai de la boîte en L (L-box test)

Pour que le BAP soit accepté, le taux de remplissage de la boîte en L (rapport des hauteurs H_2/H_1) doit être supérieur à 0,8 (AFGC [40]). Des temps d'écoulement peuvent aussi être mesurés pour apprécier la viscosité du béton.

2.6.5 Essai de stabilité au tamis

Appelé aussi essai de caractérisation de la ségrégation des bétons autoplaçants, cet essai vise à qualifier les bétons autoplaçants vis-à-vis du risque de ségrégation (cf. Figure 2.12). Il peut être utilisé en phase d'étude de formulation d'un béton autoplaçant en laboratoire, ou pour le contrôle de réception de la stabilité du béton livré sur chantier.

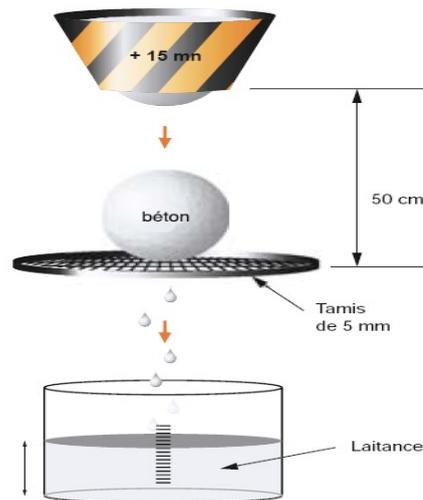


Figure 2.12 – Schéma d’essai de stabilité au tamis

Cet essai complète les essais permettant d’apprécier la mobilité, en milieu confiné ou non, en caractérisant la stabilité. Il consiste à évaluer le pourcentage en masse de laitance (poids de laitance) (cf. Figure 2.13) d’un échantillon de béton (4,8 à 0,2 kg) passant à travers un tamis de 5 mm. Les critères d’acceptabilité d’une formulation d’un béton autoplaçant sont divisés en trois classes :

$0\% \leq \Pi \leq 15\%$: stabilité satisfaisante

$15\% < \Pi \leq 30\%$: stabilité critique : essai de ségrégation à réaliser in situ

$\Pi > 30\%$: stabilité très mauvaise : béton inutilisable

Le pourcentage de laitance passant au travers le tamis est calculé selon l’expression : avec P_l (poids de laitance) et P_T (poids total d’échantillon)

$$\Pi = \frac{P_l}{P_T} \cdot 100 \quad (2.10)$$



Figure 2.13 – Mesure de la laitance du BAP par l’essai de stabilité au tamis

Les essais de ségrégation (stabilité au tamis), à la boîte en L, au V-funnel et d’étalement

ont été conduits selon les recommandations de l'AFGC [40].

2.7 Essai de la chaleur d'hydratation

Quand le ciment portland réagit avec l'eau, on observe un dégagement de chaleur pouvant être mesuré par un calorimètre. Le dégagement de chaleur ainsi que l'évolution de l'hydratation peuvent être suivis dans le temps pour comprendre les réactions qui se passent lors de l'hydratation du ciment, et établir un lien avec la prise et le développement des résistances.

Dans notre cas nous avons utilisé la méthode de la calorimétrie semi-adiabatique appelée essai «quasi-adiabatique».(Q.A.B). Cet essai est équivalent à celui de la «bouteille de LANGAVANT» pour les mortiers. L'essai Q.A.B se rapproche d'avantage de ce qui se passe dans les pièces épaisses qui sont celles où les problèmes liés aux effets thermiques sont importants.

Le caisson Q.A.B utilisé dans nos travaux est fabriqué par le CECP (Centre d'étude de construction des prototypes) d'Angers et le prototype a été étudié par le LRPC (Laboratoire Régional des Ponts de Chaussées) de Bordeaux; l'isolant du caisson est constitué de mousse polyuréthane dont le coefficient de conductivité thermique est de $0,23 \text{ W/m } ^\circ\text{C}$. Il est conçu pour recevoir une éprouvette de béton normalisée 16x32 cm. Les températures sont mesurées au centre de l'éprouvette par un thermocouple «PT 100».

Le dispositif expérimental de mesure de la chaleur d'hydratation est présenté dans la figure 2.14. Le calcul des champs de température à l'intérieur d'un élément de béton durcissant passe par la connaissance de la courbe de dégagement de chaleur de ce béton. L'essai consiste à enregistrer la température du béton en fonction du temps, dans des conditions quasi adiabatiques où les pertes de chaleur ne sont pas totalement évitées. Etant donné les pertes de chaleur apparaissant lors de l'essai, le résultat obtenu est corrigé en fonction d'un étalonnage préalable du caisson. Il est possible, à partir de la courbe de température enregistrée, de remonter à la courbe adiabatique. L'annexe B donne les valeurs de température enregistrées en fonction du temps pour les différents teneurs en pouzzolane naturelle est pouzzolane naturelle avec la poudre de marbre.

Le banc de mesure comporte deux calorimètres semi-adiabatique dont les thermocouples sont reliés à une chaîne de mesures multi-voies (Société PERRIER LABOTEST) à microprocesseur permettant de mémoriser les températures en cours d'essai. Un logiciel installé

sur un PC permet de transférer l'intégralité du contenu de la mémoire, essai par essai (cf. Figure 2.14). Il suffit de rentrer les constantes du calorimètre ainsi que les masses respectives de chaque composant introduit dans l'appareil et le logiciel calcule directement la quantité de chaleur dégagée «q» par gramme de liant. On obtient directement les courbes d'échauffement et la chaleur d'hydratation en fonction du temps.



Figure 2.14 – Dispositif expérimental pour la mesure de la Chaleur d'Hydratation

Le temps t est compté à partir du moment où l'eau est ajoutée dans le malaxeur. La chaleur d'hydratation q du ciment à un instant t est égale à :

$$q(t) = \frac{C}{m_c} \Delta\theta + \frac{1}{m_c} \int_0^t \alpha \cdot \Delta\theta \cdot dt \quad (2.11)$$

avec :

C : capacité thermique du calorimètre et de l'éprouvette [$J^\circ C^{-1}$]. [105]

2.8 Résistance mécanique du BAP

On stocke les éprouvettes dans une salle en attendant de les démouler 24 heures après. Afin d'assurer un bon mûrissement du béton, on doit maintenir une humidité satisfaisante et une température favorable durant la période d'hydratation du ciment pour éviter l'évaporation rapide de l'eau de gâchage. Les éprouvettes sont immergées dans un bac d'eau à une température d'environ 20 °C jusqu'à l'échéance de l'essai.

Les essais de résistance au compression du BAP ont été effectués sur demi éprouvettes prismatique (7x7x28) cm, à 7, 28, 56 et 90 jours, à l'aide d'une presse de capacité de

3000 kN (cf. Figure 2.15). L'éprouvette est placée et centrée entre les deux plateaux de la presse puis chargée progressivement jusqu'à la rupture. La résistance à la compression des BAP a été effectués selon la norme NF P 15-455 sur des demi-prismes obtenus après rupture en flexion de l'éprouvette (cf. Figures 2.15).



Figure 2.15 – Machine d'écrasement pour l'essai de la résistance au compression

2.9 Expansion aux sulfates

Afin d'évaluer la résistance aux sulfates des mortiers des éprouvettes 25x25x285 mm ont été préparé, cet essai est fait conformément aux règles ASTM C1012/C1012M-10. Ciment/Sable = 1/2.25 et rapport E/C=0.40. Après démoulage à 24 heures, les éprouvettes sont immergées dans de l'eau saturée de chaux à 23 °C jusqu'à 28 jours. A 28 jours les prismes sont immergés dans une solution à 50 g/l de Na₂SO₄ ou MgSO₄ à 23 °C. Les mesures d'allongement sont effectuées entre 1 et 15 semaines. Si à 15 semaines un léger allongement continu est observé, les mesures suivantes sont faites à 4, 6, 9, et 12 mois. La perte de masse et les résistances mécaniques après immersion sont mesurées après 28, 56, 90 et 180 jours d'immersion.

2.10 Attaques par les acides

Pour évaluer la résistance d'attaques par des acides des éprouvettes de mortier 40x40x160 mm ont été préparées et coupées en deux à l'aide d'une scié électrique puis immergées dans deux solutions différentes. La première solution contient de l'eau avec 1% de Hcl et la deuxième solution contient de l'eau avec 2.5% de H₂SO₄. La formulation de mortier adoptée est la même que celle de mortiers autoplaçant avec un rapport Ciment/Sable

= 1/2.25 et un rapport E/C=0.40. Après démoulage à 24 heures, les éprouvettes sont immergées dans de l'eau saturée de chaux à 20 °C jusqu'à 28 jours. A 28 jours les prismes sont immergés dans les deux solutions. Les mesures de perte en poids sont effectuées à chaque semaine au début et puis à chaque renouvellement de la solution c'est-à-dire à chaque 15 jours. Cette essai est faite Conformément aux règles ASTM C267-01.

2.11 Récapitulatif du programme des essais réalisés

Les diagrammes montrés dans les figures 2.16 et 2.17 résument les essais réalisés sur mortier avec et sans ajouts.

Les essais sur béton se divisent en deux parties les essais sur les bétons binaires et ternaires : La figure 2.18 résume les essais réalisés sur le béton à l'état frais.

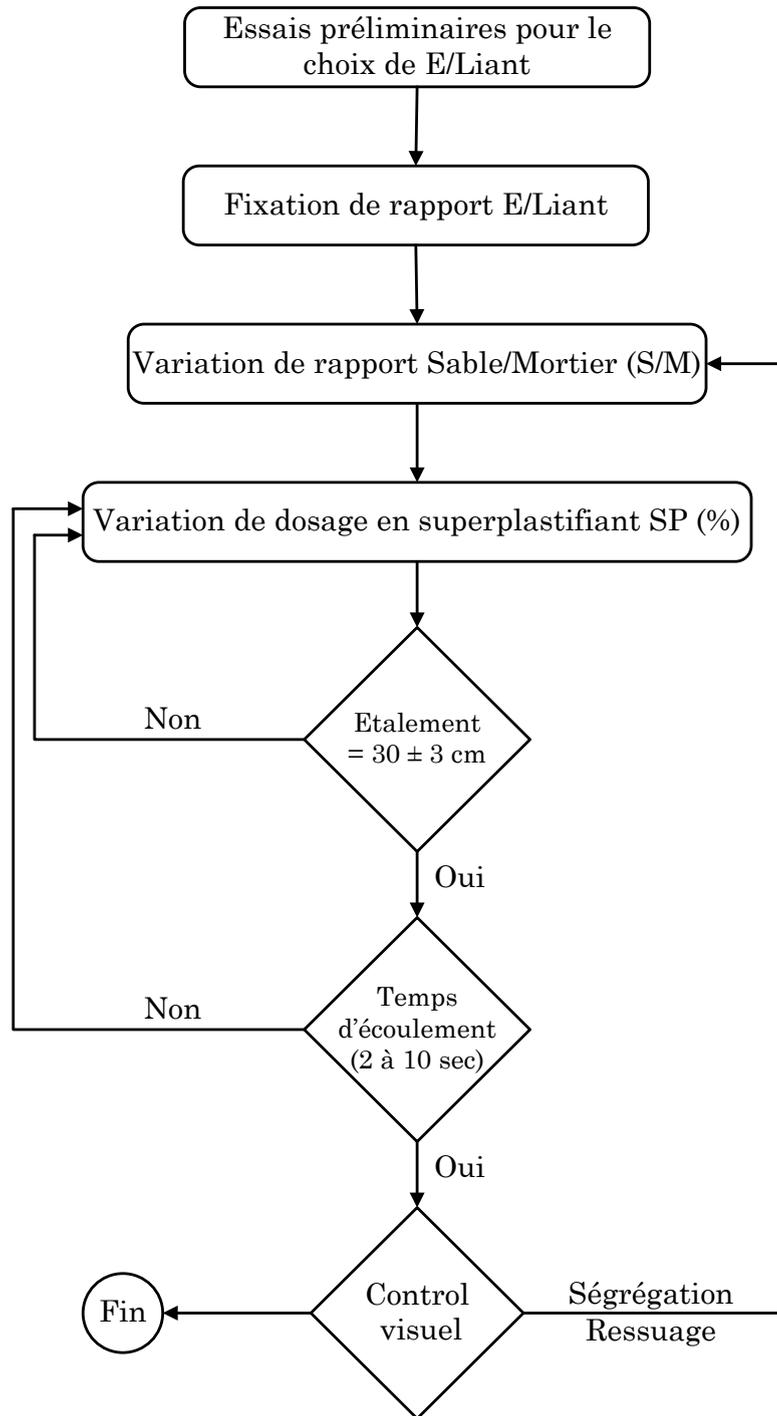


Figure 2.16 – Diagramme des essais réalisés sur mortier de référence

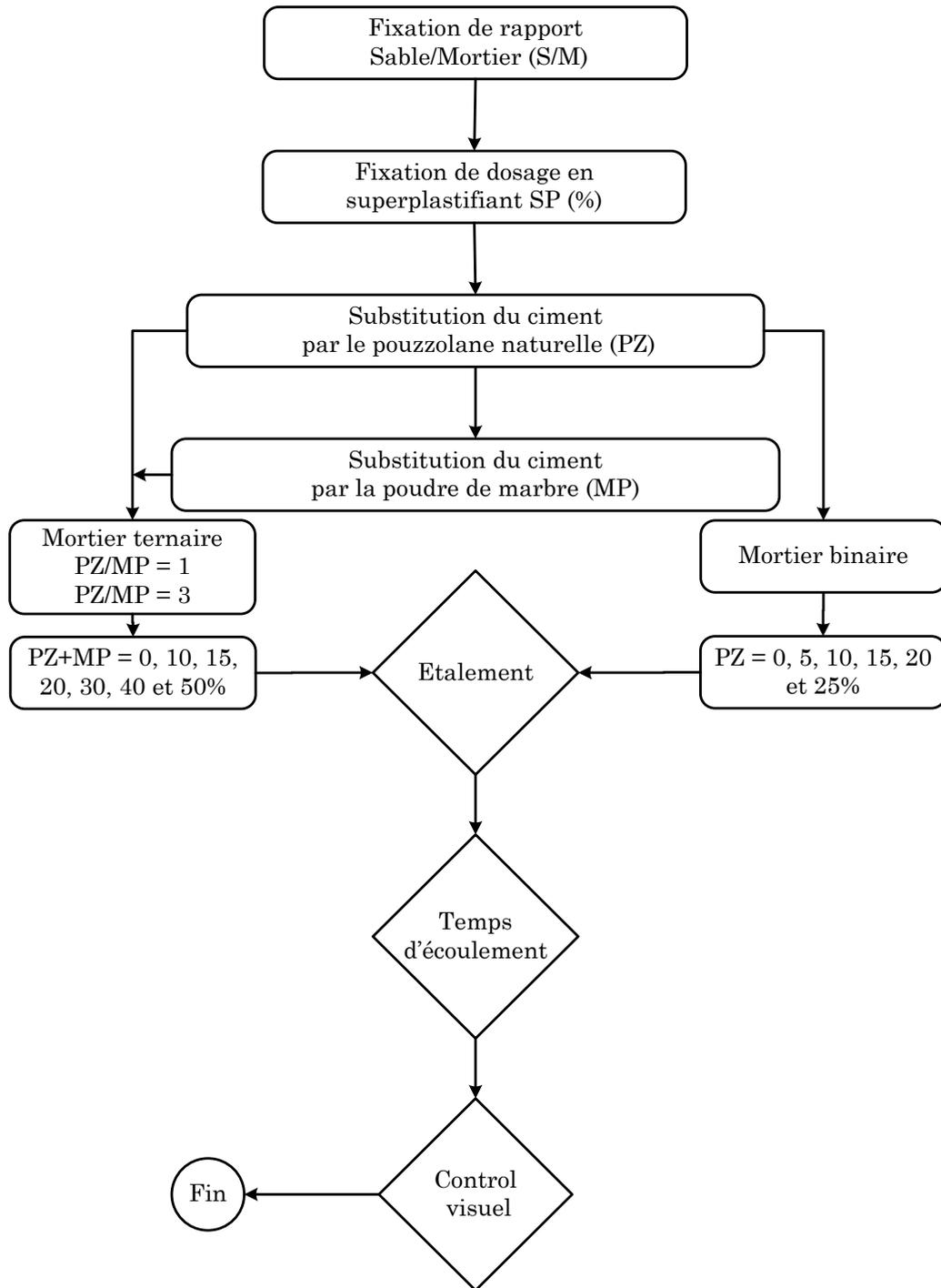


Figure 2.17 – Diagrammes des essais réalisés sur mortier avec ajouts

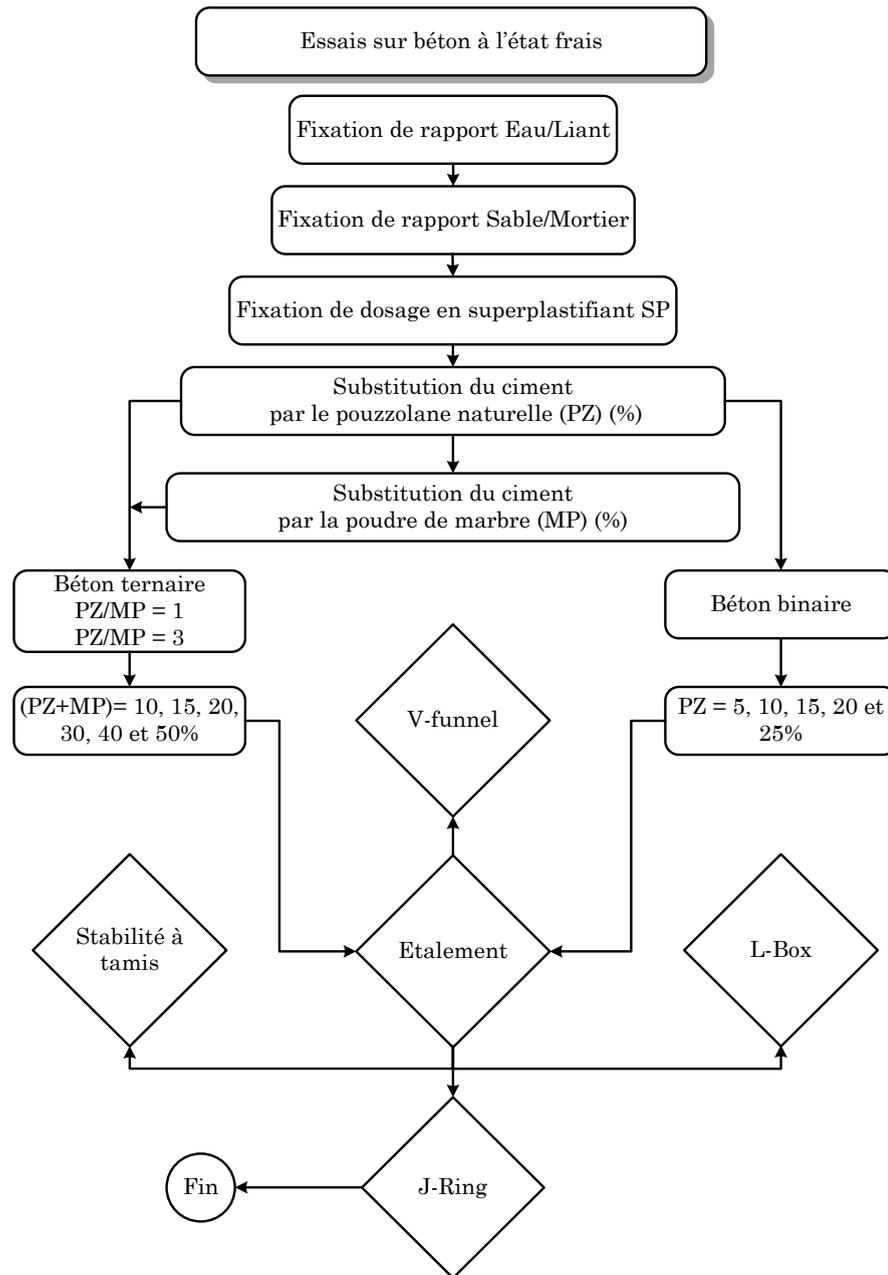


Figure 2.18 – Diagramme des essais réalisés sur le béton à l'état frais

La figure 2.19 résume les essais réalisés sur le béton à l'état durci.

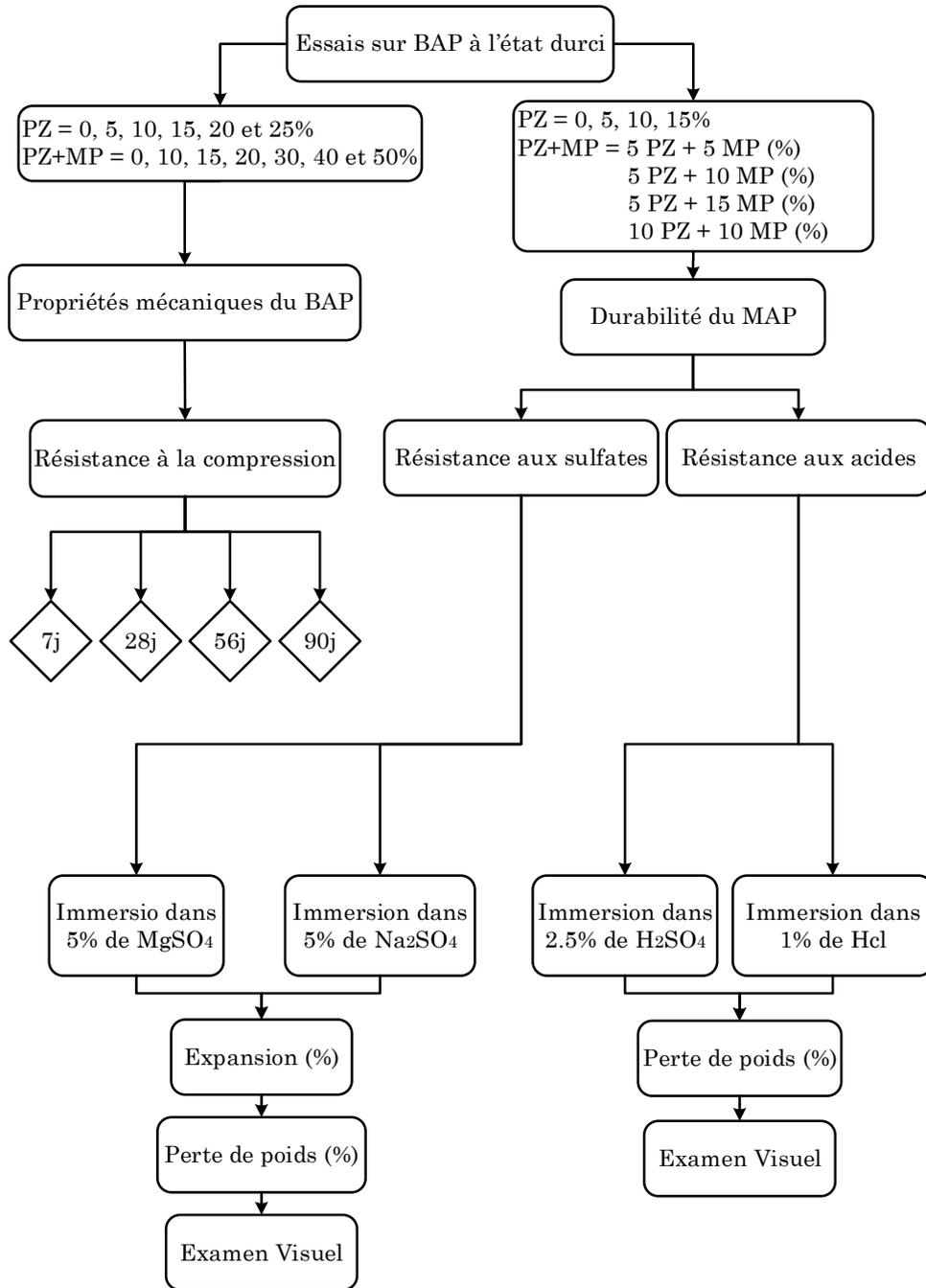


Figure 2.19 – Diagramme des essais réalisés sur le béton à l'état durci

CHAPITRE 3

ÉTUDE RHÉOLOGIQUES DES MORTIERS ET BÉTONS

AUTOPLAÇANTS

3.1 Introduction

Les bétons autoplaçants sont caractérisés par leur fluidité élevée. Cette caractéristique est affectée par l'addition des fillers, pouzzolaniques ou non pouzzolaniques, au ciment Portland. Parmi les fillers non pouzzolaniques, les fines calcaires sont les plus fréquemment utilisées dans des mélanges de BAP [106]. Différents auteurs ont établi que, les fines calcaires augmentent la stabilité et l'ouvrabilité des BAP frais [107–111]. Par ailleurs, certains auteurs [51, 63, 79, 112] ont montré que, la finesse des fillers calcaires affecte peu la demande en superplastifiant et mène de manière significative à une augmentation de la résistance à la compression particulièrement aux jeunes âges par comparaison à un béton vibré avec les mêmes rapports E/L.

Dans ce chapitre, nous présentons et analysons les différents résultats des essais sur mortiers autoplaçant (MAP) et bétons autoplaçants (BAP). La première étape consiste à effectuer des essais sur mortier afin d'optimiser le rapport Sable/Mortier (S/M). La deuxième étape consiste à fixer le rapport superplastifiant sur liant Sp/L dans les compositions des mortiers et des béton autoplaçants, tout en variant le taux de substitution du ciment par la pouzzolane naturelle seul et/ou la poudre de marbre.

3.2 Optimisation du rapport Sable/Mortier

L'optimisation du rapport Sable/Mortier consiste à varier ce rapport de telle manière à trouver un mortier autoplaçant, c'est-à-dire un étalement compris entre 270 mm et 330 mm [97]. Nous avons choisi trois valeurs du rapport S/M de 0.4, 0.5 et 0.6 avec l'utilisation d'un rapport E/L égal à 0.4 et des dosages en superplastifiant Sp/L variant entre 0.8 à 1.4%.

Les différentes formulations des mortiers autoplaçants obtenus, en fonction du rapport S/M sont présentées dans le tableau 3.1 ainsi que les résultats des essais d'étalement au

mini cône, du temps d'écoulement à l'entonnoir en V (V-Funnel) et le contrôle visuel des mortiers (cf. Figure 3.1).

Tableau 3.1 – Compositions et résultats des essais sur mortiers pour différentes valeurs du rapport Sable/Mortier (S/M).

	E/C = 0.4							
	S/M	S/M						S/M
	0.6	0.5						0.4
	M1	M2	M3	M4	M5	M6	M7	M8
Ciment (C) (kg/m ³)	548.6	696.6						822.7
Sable (S) (kg/m ³)	1656	1333.5						1104
Eau (E) (kg/m ³)	219.6	278.9						329.4
Superplastifiant (S _P)(%)	2.0	0.8	0.9	1.0	1.1	1.2	1.4	0.6
Etalement (E _t)(mm)	100	268.5	287.5	290.5	291.5	294.5	308.0	444
Temps d'écoulement (T _V)(sec)	–	10.77	5.37	5.72	5.30	5.08	4.76	3.67
Réssuage	Non	Non	Non	Oui	Oui	Oui	Oui	Oui
Ségrégation	Non	Non	Non	Non	Non	Oui	Oui	Oui

(-) Pas d'écoulement (Blocage)

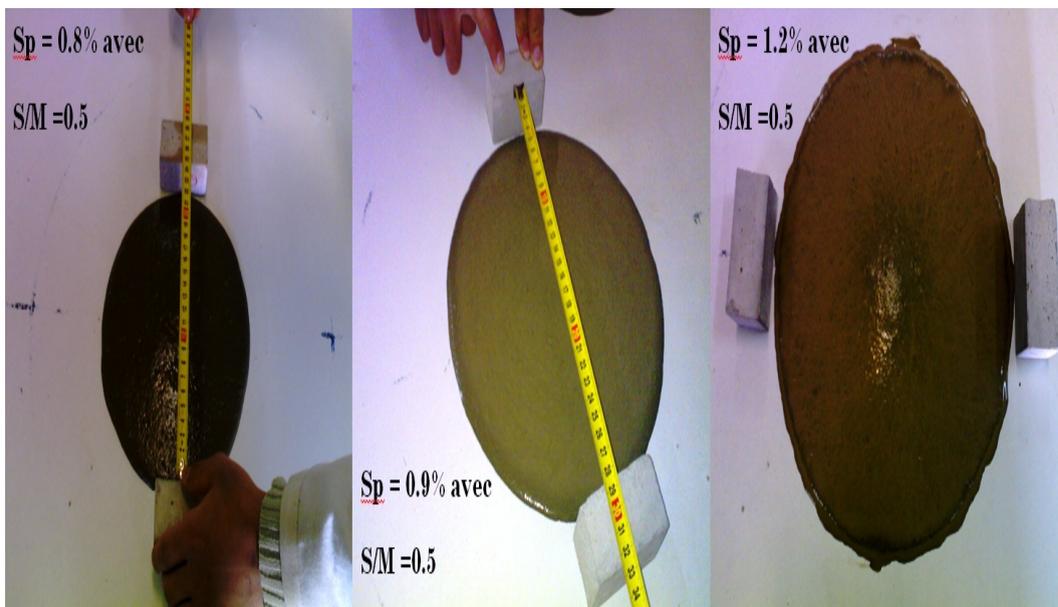


Figure 3.1 – Examen visuel de la galette de mortier autoplaçant

On remarque d'après le tableau 3.1 que les mortiers confectionnés avec un rapport (S/M) égal 0.5, sont des mortiers fluides et stables avec l'utilisation d'un pourcentage en superplastifiant compris entre 0.8 et 0.9%. Au-delà de ces valeurs, les mortiers présentent un réssuage et/ou une ségrégation. Pour les mortiers confectionnés avec un rapport S/M égal à 0.4 et Sp/L = 0.6%, le mortier est très fluide et instable. Par contre, si on augmente

le rapport $S/M=0.6$ avec $Sp/L=2.0\%$ le mortier devient ferme. Donc on peut dire à première vue que la préparation des mortiers autoplaçants avec un rapport S/M de 0.4 et 0.6 n'est pas évidente.

La diminution du rapport Sable/Mortier mène à une réduction du volume de sable, et par conséquent à l'augmentation du volume de la pâte de ciment, ce qui contribue significativement à l'amélioration de la fluidité. Westerholm et al [113] affirment que la grande quantité de sable fin dans le mélange de mortier influe sur la rhéologie de ce dernier, elle augmente le seuil de cisaillement ainsi que la viscosité plastique. Fang et al [114] ont trouvé que, pour la fabrication d'un béton autoplaçant à haute performance, il est préférable de prendre de rapport Sable/Mortier entre 45 et 48%. Spengler et Schiessl [115] ont pu obtenir un bon BAP quatre (4) fois plus riche en sable qu'en gravier (sable 80% et gravier 20%) avec un rapport E/C égale à 0,5.

Du fait de la concordance de nos résultats avec ceux de la bibliographie, alors le rapport S/M sera fixé pour la suite des essais à 0,5.

3.3 Effet des Superplastifiants sur le mortier frais

Le superplastifiant est utilisé pour fluidifier le béton sans ajout d'eau. Cette molécule de superplastifiant sépare physiquement les grains de ciment en neutralisant leur force d'attraction. La première partie de superplastifiant est consommée lors des réactions chimiques, la deuxième partie est adsorbée sur la surface des particules de ciment et la troisième partie reste dans la phase aqueuse. Une fois que suffisamment de polymères aient été ajoutés pour satisfaire la consommation du polymère, le système est ainsi saturé en polymères [116]. À partir des essais sur mortiers, on optimise le rapport Sp/L et par conséquent on fixe ce rapport au niveau des essais sur béton autoplaçant. Cette optimisation a été faite à partir des deux essais sur mortier, la mesure d'étalement par le mini-cône et la mesure du temps d'écoulement par l'entonnoir en V et un contrôle visuel sur l'apparition de deux phénomènes le ressuage et la ségrégation est ensuite réalisé.

3.3.1 Etalement au mini-cône pour les mortiers

La Figure 3.2 montre l'effet du superplastifiant à base de polycarboxylates sur l'étalement des mortiers. On remarque que l'ajout de superplastifiant avec des pourcentages croissants augmente l'étalement de mortier.

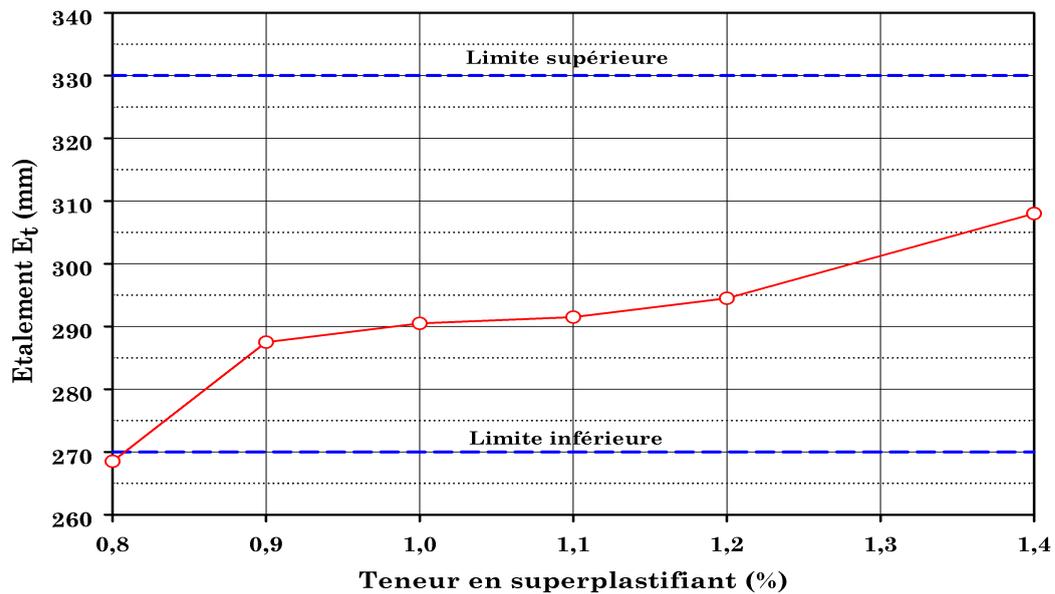


Figure 3.2 – Variation de l'étalement par mini-cône en fonction de teneur en superplastifiant

On constate que tous les mélanges des mortiers présentent des étalements recommandés de 300 ± 30 mm. À l'exception du mortier avec 0.8% de Sp donne un étalement légèrement inférieur aux exigences recommandés par Domone [97]. Le dosage de superplastifiant de 0.9% donne un mortier stable et fluide avec un étalement de 287 mm. Par conséquent, on a fixé ce pourcentage de 0.9% pour le reste des essais, cette valeur de Sp me semble être proche de valeur de dosage de saturation en superplastifiant. Les dosages supérieurs à 0.9% ont été rejetés car ils ont donné des mélanges fluides avec des étalements qui dans l'intervalle de 270mm à 330mm, mais ces mélanges des mortiers présentent des risques de ressuage et/ou de ségrégation visible à l'œil nu.

3.3.2 Temps d'écoulement à l'entonnoir en V pour mortiers

L'évolution de temps d'écoulement des mortiers, par utilisation du mini V-funnel, en fonction des teneurs en superplastifiants est représentée en figure 3.3.

Pour valider les résultats obtenus par l'essai d'étalement par mini-cône, on mesure le temps d'écoulements pour les mêmes mortiers par mini V-funnel. Les résultats montrent que les mortiers dosés en superplastifiant de 0.9% jusqu'à 1.4% nous donnent un effet similaire à celui d'étalement avec des valeurs du temps comparable entre 4.5 à 5.3 s. Ce qui satisfait les valeurs limites de 2 à 10 s proposé par Domone [97]. La figure 3.4 montre que le dosage de saturation en superplastifiant est de l'ordre de 0.9%. ce qui traduit par une perte de

viscosité au delà de cette valeur. On remarque aussi que le mortier avec un dosage de 0.8% de superplastifiant a donner un mortier plus ferme par rapport aux autres.

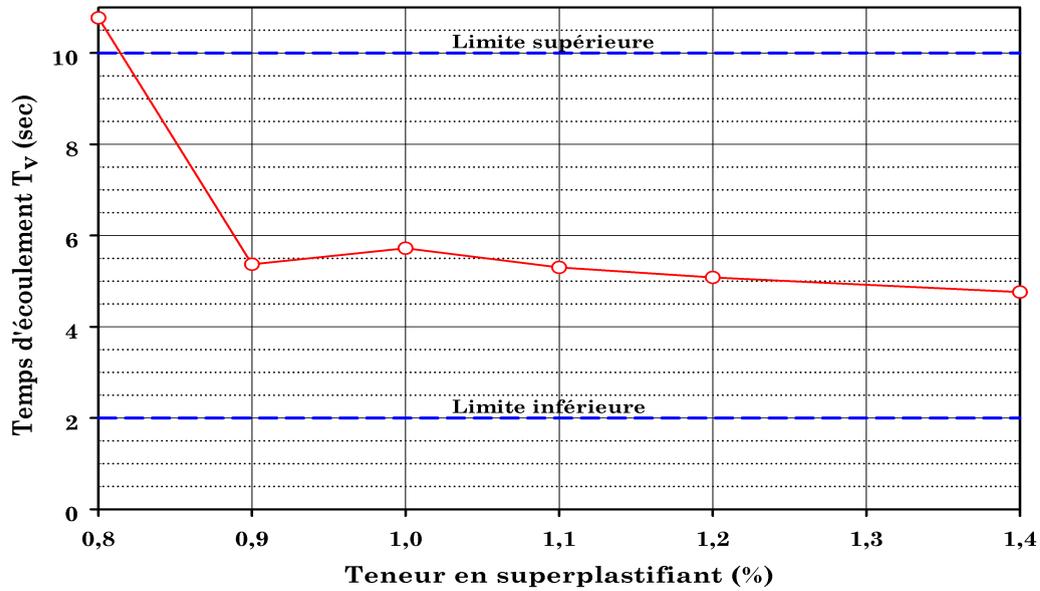


Figure 3.3 – Variation de temps d'écoulement par V-funnel en fonction du dosage en superplastifiant

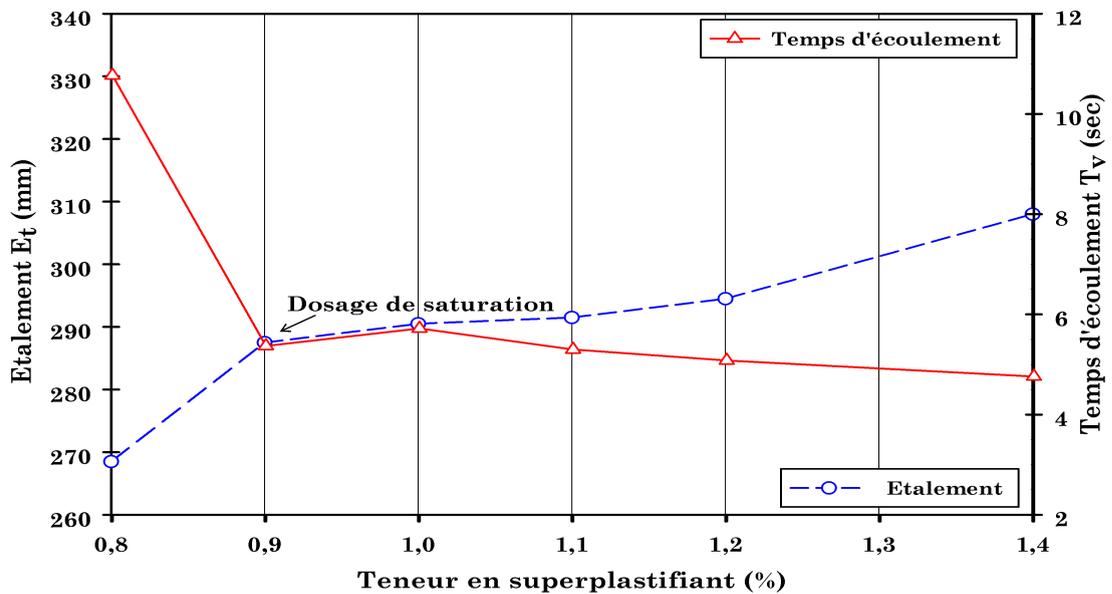


Figure 3.4 – Variation de l'étalement et temps d'écoulements en fonction de teneur en superplastifiant

En se basant sur ces résultats, le rapport Sp/L est fixé 0.9% pour la suite des essais

sur les MAP et les BAP.

3.4 Mortier autoplaçant à base de pouzzolane naturelle

Le tableau 3.2 et la figure 3.5 montrent la variation d'étalement et du temps d'écoulement des mortiers binaires ciment et pouzzolane (C+PZ) après 5 et 60 min de malaxage.

Tableau 3.2 – Résultats à l'état frais des mortiers à base de la pouzzolane naturelle

		E/C = 0.4					
		Sable / Mortier = 0.5					
		M3	MPZ1	MPZ2	MPZ3	MPZ4	MPZ5
Pouzzolane	%	0	5	10	15	20	25
Superplastifiant	%	0.9					
$E_t(mm)$	5 min	287.5	292.0	287.0	290.0	257.0	141.0
	60 min	282.0	277.0	266.0	261.5	203.5	100
$T_v(sec)$	5 min	5.37	4.18	3.96	4.14	4.59	7.15

On observe que l'étalement après 5 min de malaxage reste pratiquement constant avec l'augmentation de la teneur en pouzzolane jusqu'à une teneur de 15%. Au-delà de 15% de substitution la perte d'étalement est de l'ordre de 11 et 51% pour des teneurs en pouzzolane entre 20 et 25%. Ce perte d'étalement est probablement dû à l'absorption d'eau par le pouzzolane naturelle et à la consommation de superplastifiant.

Le béton perd de son ouvrabilité sous l'effet de deux principaux mécanismes :

- La rigidité plastique occasionnée par la perte d'eau dans le mélange suite à son évaporation et à l'hydratation initiale du ciment ; une perte d'ouvrabilité progressive qui peut être en partie rétablie ;
- La restructuration ou thixotropie qui représente la perte d'ouvrabilité temporaire réversible.

L'étendue de la perte d'ouvrabilité dépend de plusieurs facteurs : de la granulométrie et de la densité de tassement des particules, de la composition chimique du ciment, des conditions ambiantes et du temps.

En ce qui concerne l'étalement après 60 min de malaxage, un effet presque similaire est remarqué en comparaison aux étalements mesurés après 5 min de malaxage.

La perte d'étalement est de l'ordre de 2, 5, 7, 10, 21 et 29% pour les mortiers qui contiennent respectivement 0, 5, 10, 15, 20, 25% de pouzzolane. La substitution du ciment par la pouzzolane naturelle présente un effet bénéfique sur la viscosité du mélange (cf. Figure 3.5). Un temps d'écoulement par mini V-funnel de l'ordre de 4 seconds pour un taux de substitution de 10 à 15%.

On note ici que toutes les valeurs du temps d'écoulement par le mini V-funnel sont dans l'intervalle 2 à 10 sec, proposé par Domone pour les mortiers autoplaçants [97]. Ceci montre l'effet bénéfique de la pouzzolane sur la viscosité des différents mélanges. Par contre, cet effet n'est pas évident pour l'étalement et par conséquent on peut dire que c'est dû au seuil de cisaillement un peu élevé que donne de la pouzzolane naturelle aux mortiers.

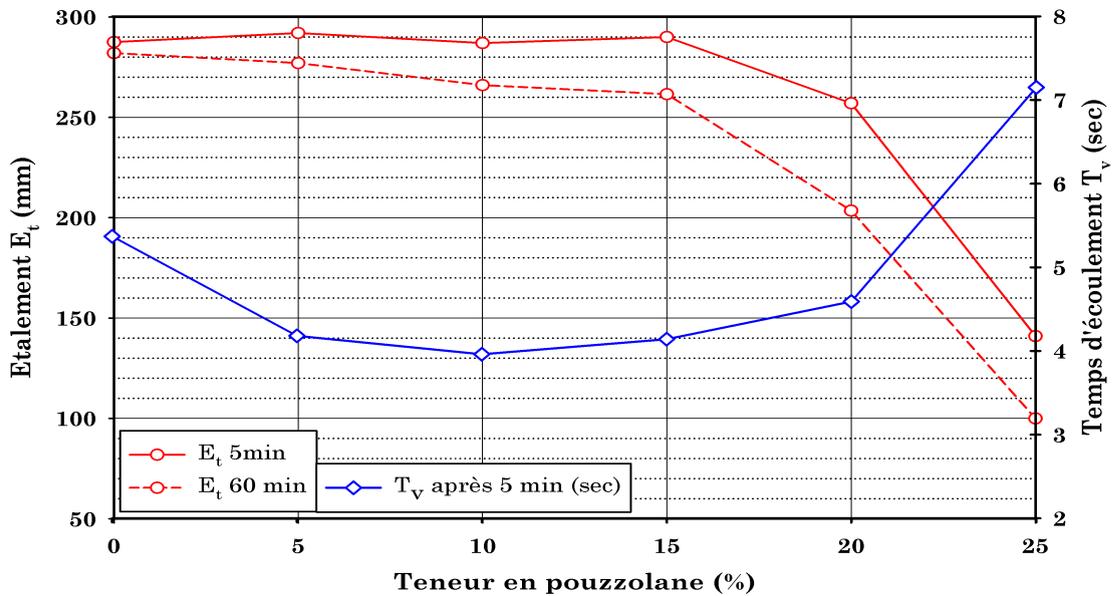


Figure 3.5 – Etalement et temps d'écoulement du mortier en fonction de la teneur en pouzzolane naturelle

3.5 Mortier autoplaçant binaire à base de la poudre de marbre

Les résultats des essais d'étalements par mini cône et temps d'écoulement par mini V-funnel sur les mortiers autoplaçants à base de poudre de marbre sont illustrées dans le tableau 3.3 et la figure 3.6.

Tableau 3.3 – Résultats à l'état frais des mortiers à base de la poudre marbre

		Sable / Mortier = 0.5						
		M3	MMP1	MMP2	MMP3	MMP4	MMP5	MMP6
Poudre de marbre	%	0	5	10	15	20	25	30
Superplastifiant	%	0.9						
$E_t(mm)$	5 min	287.5	307	311	315	320	323	325
	60 min	282.0	301	306	307	312	315	320
$T_v(sec)$	5 min	5.37	3.07	2.91	2.73	2.67	2.43	2.41

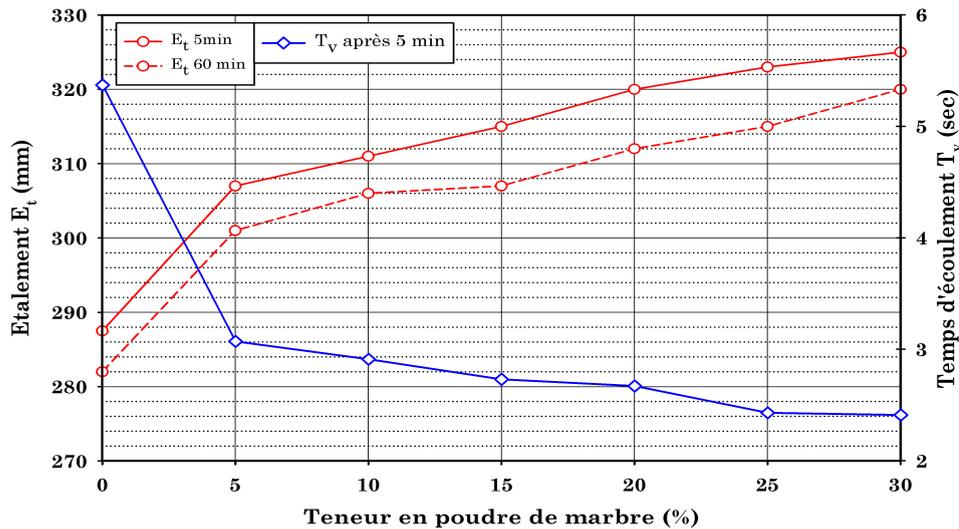


Figure 3.6 – Étalement et temps d'écoulement du mortier en fonction de la teneur en poudre de marbre

Selon les résultats on remarque que l'étalement varie entre 300 à 320mm lorsque la teneur en poudre de marbre augmente de 5 à 30%, ces valeurs montrent l'effet bénéfique de la poudre de marbre sur le plan gain d'ouvrabilité, et cela est dû à l'effet de dilution engendré par la poudre de marbre. Le temps d'écoulement diminue avec l'augmentation de la poudre de marbre. Ces variations montrent que la poudre de marbre diminue la viscosité des mortiers ce qui apporte une amélioration des caractéristiques rhéologiques des mortiers.

Il faut noter que l'étalement après 60 min de malaxage présente la même tendance que l'étalement à 5 minutes avec des pertes en étalement de 5 à 8 mm de diamètre.

L'utilisation de la poudre de marbre dans les mortiers a apporté un net gain sur la capacité d'écoulement des mélanges. Le temps de l'écoulement par le mini V-funnel diminue d'une manière considérable par rapport au temps obtenu par le mortier de référence de 43, 54, 49, 50, 55 et 55% pour les mortiers contenant respectivement de 5, 10, 15, 20, 25 et 30% de poudre de marbre. Par conséquent la poudre de marbre a provoqué également une diminution de la viscosité des mortiers d'une manière considérable.

3.6 Béton autoplaçant binaire

3.6.1 Effet de la pouzzolane sur l'ouvrabilité des BAP à l'état frais

L'effet de la pouzzolane sur l'ouvrabilité des bétons autoplaçants à l'état frais est analysé à travers une série d'essais particuliers aux BAP, permettant d'étudier la variation

de l'ouvrabilité en fonction du dosage du mélange en pouzzolane.

Le tableau 3.4 donne les compositions des six bétons testés avec comme béton de référence le BAP1 qui contient 0% de pouzzolane.

Selon les recommandations de l'AFGC un béton autoplaçant doit présenter à la fois un étalement supérieur ou égal à 60, un rapport à la boîte en L supérieur ou égal à 0,8 et une stabilité au tamis inférieur à 15%. Quand la stabilité au tamis est entre 15 et 30% elle est jugée critique et il est nécessaire de procéder à des essais spécifiques de ségrégation. Le tableau 3.5 donne les résultats des différents essais sur l'ouvrabilité des six BAP à l'états frais.

Tableau 3.4 – Composition des bétons autoplaçants à base de la pouzzolane naturelle

		BAP1	BAP2	BAP3	BAP4	BAP5	BAP6
Ciment (C)	(kg/m ³)	475	451	427	404	380	356
	(%)	100	95	90	85	80	75
Pouzzolane (Pz)	(%)	0	5	10	15	20	25
	(kg/m ³)	0	24	48	71	95	119
Gravier (3/8)	(kg/m ³)	276.67					
Gravier (8/15)	(kg/m ³)	553.33					
Sable	(kg/m ³)	885.9					
Eau	(kg/m ³)	190					
Sp/L	(%)	0.9					
	(kg/m ³)	4.27					

Tableau 3.5 – Résultats des essais à l'état frais pour les BAP à base de pouzzolane

		BAP1	BAP2	BAP3	BAP4	BAP5	BAP6
Ciment (C)	(%)	100	95	90	85	80	75
Pouzzolane (PZ)	(%)	0	5	10	15	20	25
Essai d'étalement	T ₅₀₀ (sec)	1.15	1.39	0.95	1.82	**	**
	E _t (mm)	760	779	777	764.5	342	269.5
Essai J-ring	T ₅₀₀ (sec)	3.18	1.12	2.85	2.18	**	**
	E _t (mm)	755	697	736.5	651.5	–	–
	B _j (mm)	8.00	10.25	14.00	18.25	–	–
Essai V-funnel	T _V (sec)	6.08	6.10	8.52	9.81	–	–
Essai de stabilité à tamis	Laitance (%)	8.84	10.75	12.34	14.71	0.00	0.00
Essai L-box	H ₂ /H ₁ (%)	92.78	80.53	84.63	86.04	–	–
	T ₂₀₀	0.83	1.34	0.63	1.45	**	**
	T ₄₀₀	0.90	1.43	1.31	1.63	**	**

(-) Pas d'écoulement (Blocage)

(**) Valeur non mesurable

3.6.2 Etalement des bétons au cône d'Abrams

La variation d'étalement des bétons en fonction de la teneur en pouzzolane est représentée dans la figure 3.7.

Les étalements des BAP à base de pouzzolane sont compris entre 269 et 779 mm. on observe d'après cette figure, que la pente du graphe diminue brusquement au-delà de 15% de pouzzolane, et l'étalement diminue par conséquent. Cette diminution d'étalement correspond à une augmentation du taux de pouzzolane, le seuil de cisaillement τ_0 des mélanges augmente de ce fait avec l'augmentation de pourcentage de pouzzolane. Cela est aussi remarqué pour les mortiers à base de pouzzolane, donc la corrélation entre le béton et le mortier semble être possible.

On constate également que le temps d'écoulement T_{500} augmente avec l'augmentation du pourcentage de pouzzolane. Cela signifie que la viscosité du béton a augmenté considérablement lorsque la pouzzolane est partiellement substituée au ciment. Selon EFNARC 2005 [104] proposent trois classes d'étalement varie entre 550 mm et 850 mm pour obtenir un béton autoplaçant. Nous remarquons aussi que les valeurs de T_{500} sont inférieurs à la limite de 2 sec proposé par EFNARC. Les BAP contenant 0 à 15% de pouzzolane peuvent être classé en première classe de viscosité.

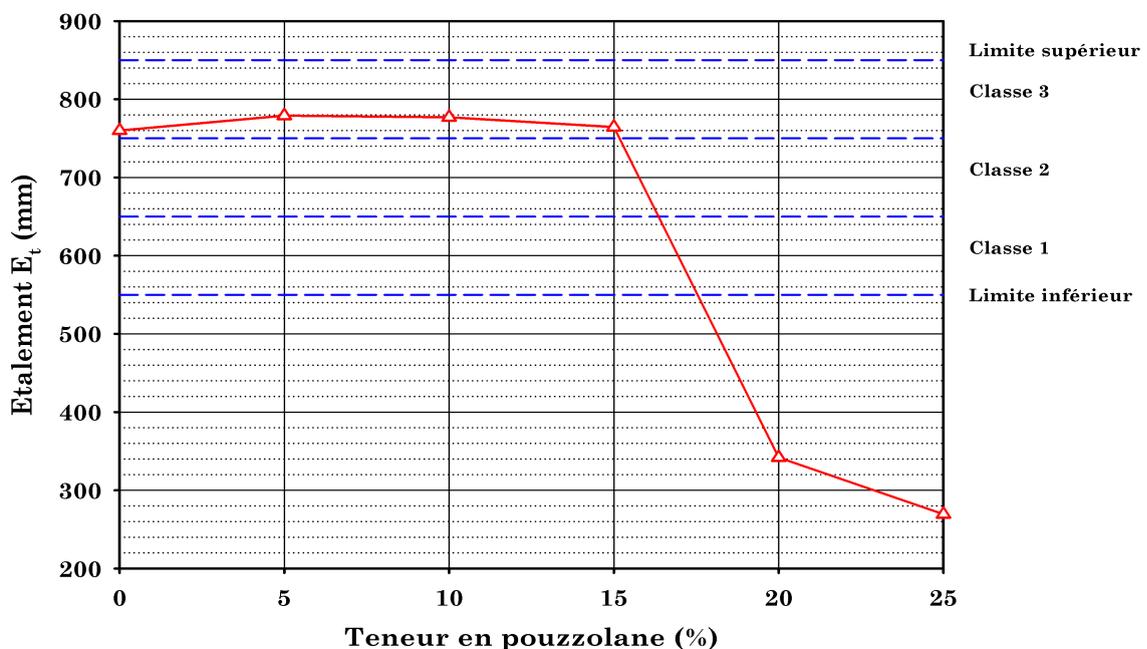


Figure 3.7 – Etalement des bétons autoplaçant à base de la pouzzolane naturelle

3.6.3 Temps d'écoulement par l'essai d'entonnoir en V (V-Funnel)

L'effet de substitution du ciment par la pouzzolane naturelle sur le temps d'écoulement à l'essai d'entonnoir (V-Funnel) est illustrée dans la figure 3.8.

On remarque que les valeurs d'écoulement à travers V- funnel sont tous dans l'intervalle (2 à 10 sec) proposé par Domone [97] pour le béton binaire (PZ+C), à l'exception des BAP contenant plus de 15% de pouzzolane. Ces bétons présente une viscosité élevée par rapport aux autres, se qui traduit par un blocage en V-funnel. Cela est dû à la consommation d'eau par la pouzzolane naturelle est l'effet de finesse (granulométrie de mélange) et l'effet de tassement des particules.

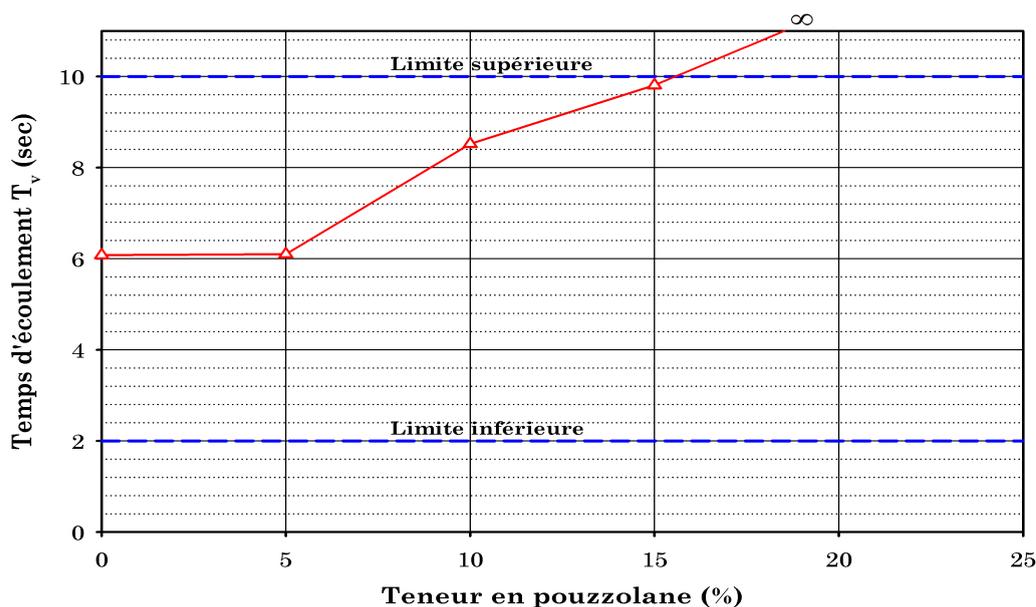


Figure 3.8 – Temps d'écoulement à l'entonnoir en V des bétons binaire

3.6.4 Capacité de remplissage par l'essai de la Boîte en L

La caractéristique de l'essai de la boîte en L (L-Box) est qu'il donne une bonne appréciation sur les trois capacités, de remplissage, de passage et de la résistance à la ségrégation. La variation du rapport H_2/H_1 en fonction du pourcentage de pouzzolane est montré sur la figure 3.9. La substitution de ciment jusqu'à 15% na pas affecté la capacité de remplissage des BAP, le rapport H_2/H_1 varie entre 80.5 et 92.7%, et par conséquent reste supérieur à la limite proposé par EFNARC. Les bétons contenant plus de 15% de pouzzolane et en raison de consommation d'eau par le pouzzolane, les mortiers présente une viscosité élevée ce qui traduit par une forte frottement entre les constituents du béton ce qui resulte un blocage au niveau des armatures (H_2/H_1 nul).

Güneyisi et al [117] ont trouvé que l'utilisation des ciments à base de pouzzolane (CEM II/A-P 42.5R) avec combinaison des différents pourcentages de laitier (système ternaire) a diminué le rapport H_2/H_1 par rapport à celui des mélanges à base de ciment portland ordinaire (CEM I 42.5R). Borsi et al [118] ont aussi trouvé que la mobilité du BAP avec du laitier ou un mélange laitier-cendre volantes est beaucoup plus élevée que celle du BAP avec les cendres volantes uniquement. Ce dernier apparaît être très cohésif et donc plus lent que les autres mélanges.

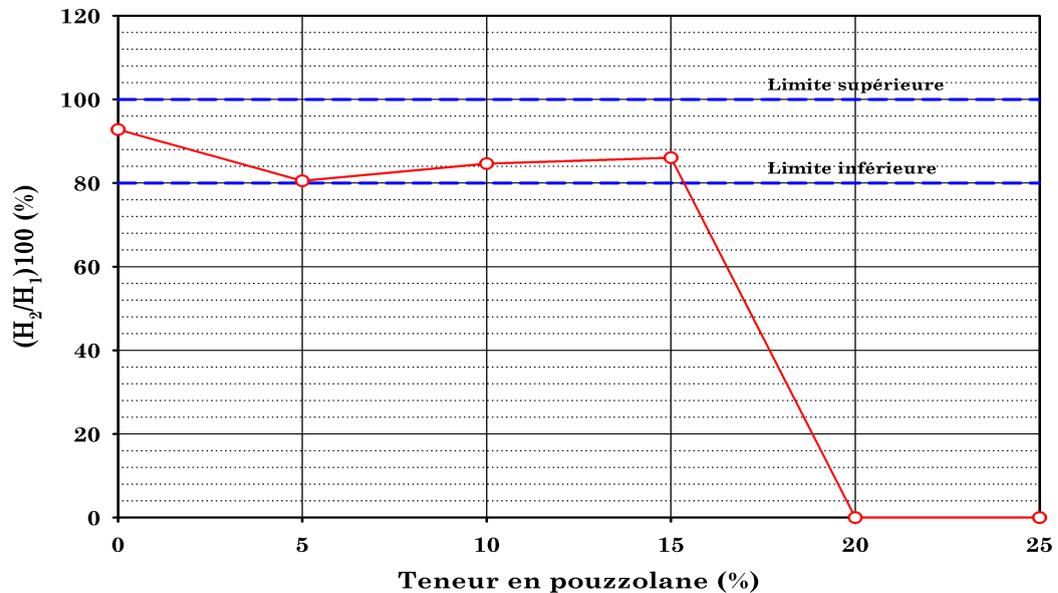


Figure 3.9 – Capacité de remplissage par L-Box pour les bétons à base de pouzzolane

3.6.5 Essai J-Ring

La tendance d'un BAP au phénomène de blocage se mesure par sa capacité d'écoulement à partir d'un cône disposé au centre d'un anneau contenant des barres d'armatures (J-Ring). On mesure généralement l'étalement et la différence d'hauteur. Cependant, il est généralement admis que pour satisfaire le risque de non blocage, il faut que la différence d'hauteurs $H_{int} - H_{ext}$ soit inférieure à 20mm. Certains auteurs [119] estiment que le risque de non blocage n'est satisfait que si $H_{int} - H_{ext} \leq 15mm$.

Les résultats obtenus à partir des essais J-Ring sont présentés sur la Figure 3.10. On remarque que le risque de blocage des mélanges contenant jusqu'à 15% de pouzzolane est faible et cela est traduit par des différences d'hauteur qui varient de 8 à 18mm. La même tendance est constatée sur la Figure 3.11 pour l'étalement qui varie entre 651 à 755mm ce qui rend le béton toujours auto-plaçant.

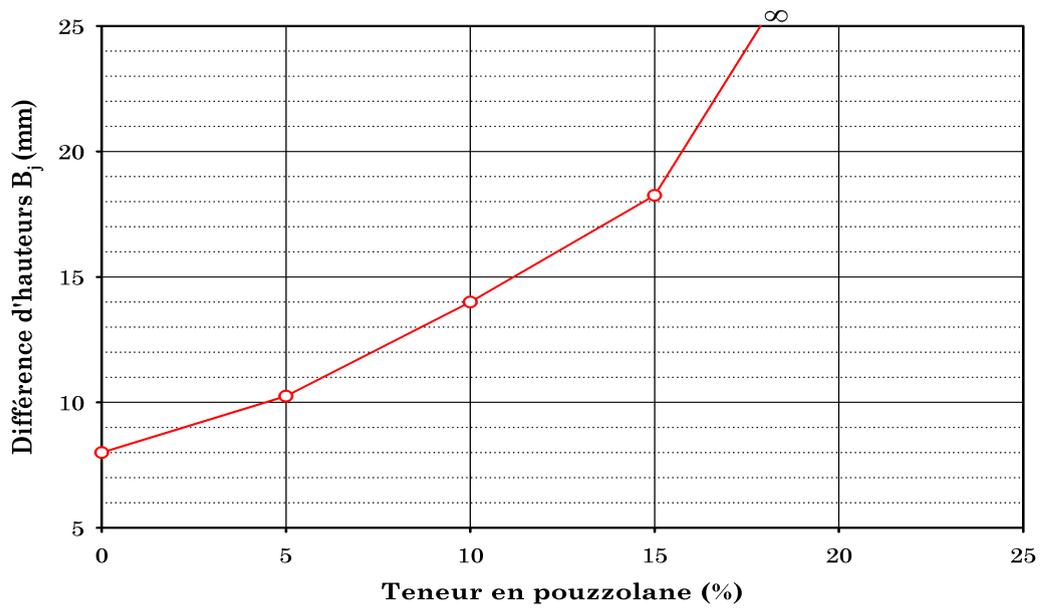


Figure 3.10 – Différence d'hauteurs B_j pour les bétons binaire

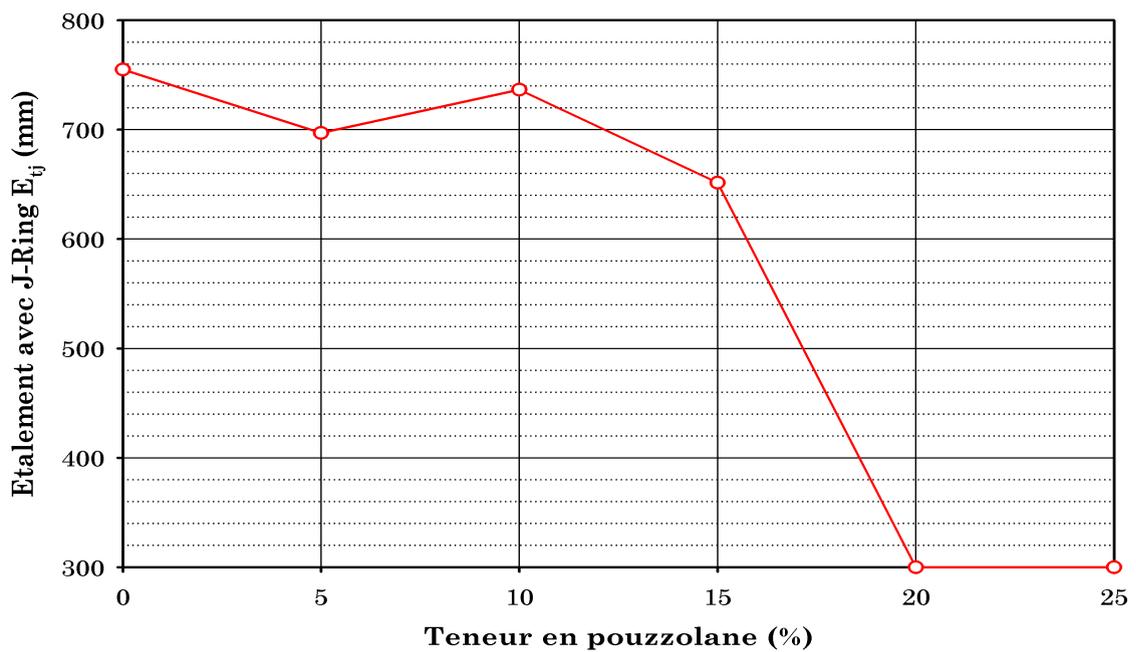


Figure 3.11 – Étalement avec J-Ring pour les bétons à base de pouzzolane naturelle

Par contre pour les BAP contenant plus de 15% de pouzzolane naturelle, le risque de blocage est présent. Au-delà de 15% de pouzzolane la seuil de cisaillement τ_0 augmente, et la possibilité de passage devient difficile.

3.6.6 Stabilité au Tamis

Les résultats de l'essai à la stabilité au tamis sont regroupés dans le Tableau 3.5 et la figure 3.12.

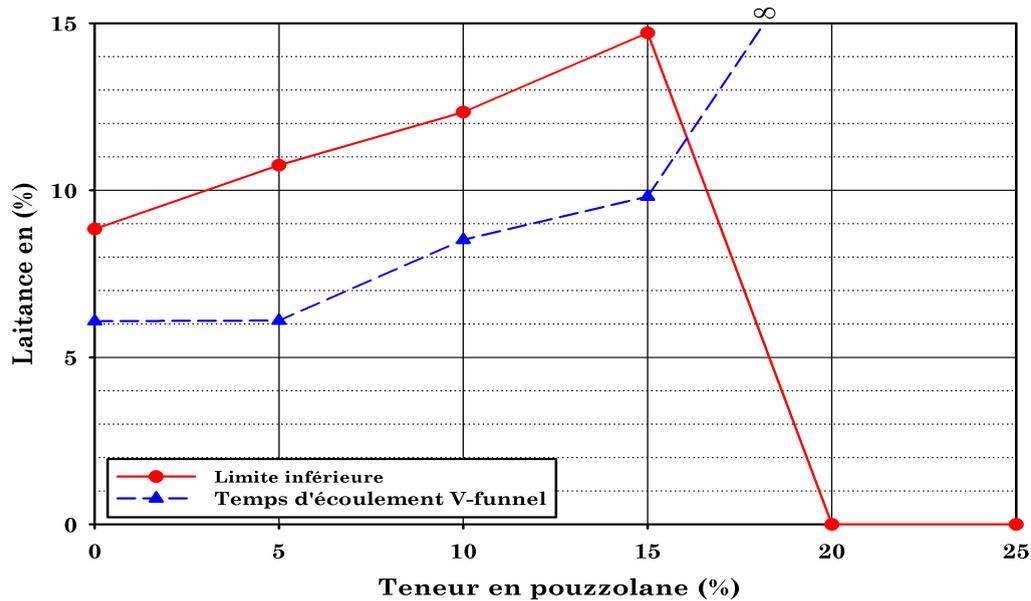


Figure 3.12 – Laitance bétons à base de pouzzolane naturelle

On remarque que les valeurs de laitance des BAP binaires sont inférieures à celles données par les normes. EFNARC donne deux sous classes pour cette essai : une laitance inférieure à 23% pour la sous classe SR1 et inférieure à 18% pour la sous classe SR2. Par Contre, L'Assosiation français de génie civil [40] exige une proportion de 5 à 15% de l'échantillon passant à travers le tamis pour une résistance optimale à la ségrégation.

Dans notre cas, on note que les mélanges de béton contenant jusqu'à 15% de pouzzolane satisfont les conditions, mais au-delà de 15% de substitution, le béton devient plus un béton autoplaçant et la laitance est nul. Safawi et al [120] ont montré que le temps d'écoulement au V-funnel est un important outil pour décrire la tendance à la ségragation. Ainsi, pour de très faibles temps d'écoulement (inférieur à 2 secondes), la tendance au béton à ségréguer est très élevée, ce qui implique que les mélanges à faible viscosité sont facilement ségréguables.

3.6.7 Perte d'ouvrabilité

L'effet de la durée de maintien d'ouvrabilité par le superplastifiant est analysé par la mesure d'étalement après des intervalles de temps de 30, 60, et 90 min après malaxage.

Les variations des étalements en fonction de la durée après malaxage sont montrées dans la figure 3.13. Les mélanges de béton ne semblent perdre leur ouvrabilité qu'après 60 min. On doit signaler ici que la perte d'ouvrabilité est elle-même un paramètre rhéologique, elle donne la déformation du mélange en fonction du temps.

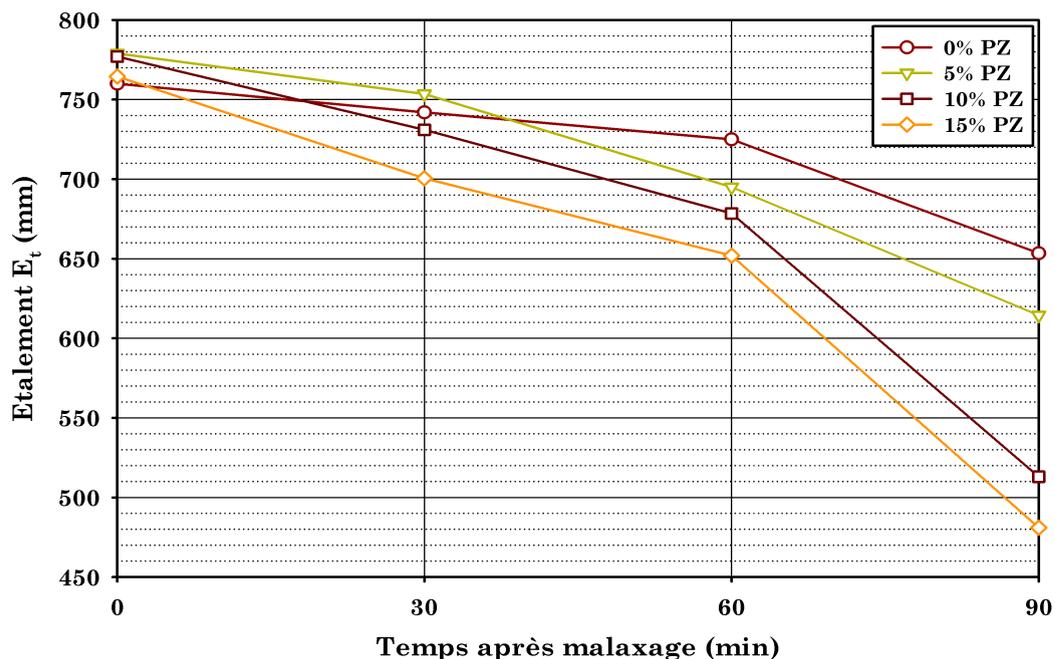


Figure 3.13 – Perte d'ouvrabilité en fonction du temps

Après 60 minutes, les bétons ne sont plus considérés comme des BAP pour des valeurs supérieures à 5% de PZ. Alors, on peut conclure que le maintien d'ouvrabilité par le superplastifiant à base de polycarboxylates est assurée pendant une heures après le malaxage des BAP, ce qui facilite leur transport et la mise en œuvre. La perte d'ouvrabilité est de l'ordre de 14, 21, 34, 37% respectivement pour les BAP de 0, 5, 10, 15%PZ après 90 min de malaxage. On remarque aussi que si on veut prolonger la durée de maintien d'ouvrabilité jusqu'à 90 min le taux de pouzzolane naturelle doit se limiter à 5%. Sonebi et Bartos [58] ont trouvé une perte d'ouvrabilité à 70 min après malaxage à moins de 10% pour des bétons à base de laitiers et à base des fillers calcaire.

3.7 Mortier autoplaçant ternaire pouzzolane, poudre de marbre (PZ+MP)

Après avoir connu l'effet de chaque ajout (soit la pouzzolane naturelle seule ou la poudre de marbre seule) sur le comportement rhéologique du mortier autoplaçant, on passe à la combinaison des deux ajouts (pouzzolane naturelle + poudre de marbre) pour voir le comportement rhéologiques des mortiers autoplaçant, pour cela nous avons substitué le

ciment avec des pourcentages qui varient entre 10 à 50%.

Les Tableaux 3.6 et 3.7 montrent les variations d'étalement et les temps d'écoulement des mortiers ternaires (PZ+MP) pour deux rapports différents de PZ/MP de 1 et de 1/3.

Tableau 3.6 – Résultats des essais à l'état frais des mortiers ternaires : PZ/MP=1

	PZ/MP=1						
	M3	MT1	MT2	MT3	MT4	MT5	MT6
Ciment (%)	100	90	85	80	70	60	50
Taux de substitution (%)	0	10	15	20	30	40	50
Pouzzolane (%)	0	5	7.5	10	15	20	25
Poudre de marbre (%)	0	5	7.5	10	15	20	25
Superplastifiant (%)	0.9						
$E_t(mm)$	287.5	297.5	306.5	293.0	297.0	299.0	172.5
$T_v(sec)$	5.37	3.74	3.71	3.74	3.93	2.80	5.65

Tableau 3.7 – Résultats des essais à l'état frais des mortiers ternaires : PZ/MP=1/3

	PZ/MP=1/3						
	M3	MT7	MT8	MT9	MT10	MT11	MT12
Ciment (%)	100	90	85	80	70	60	50
Taux de substitution (%)	0	10	15	20	30	40	50
Pouzzolane (%)	0	2.5	3.75	5	7.5	10	12.5
Poudre de marbre (%)	0	7.5	11.25	15	22.5	30	37.5
Superplastifiant (%)	0.9						
$E_t(mm)$	287.5	300.5	308.0	303.5	302.5	307.5	296.0
$T_v(sec)$	5.37	3.51	3.91	3.23	3.01	2.82	3.10

3.7.1 Etalement par mini-cône pour les mortiers ternaire

La figure 3.14 montre la variation de l'étalement par mini-cône en fonction de la teneur en pouzzolane et en poudre de marbre. On constate que pour les mortiers ternaires (PZ/MP=1), la combinaison des deux ajouts semble améliorer l'ouvrabilité jusqu'à 40% de substitution avec un gain d'étalement de 3.5, 6.6, 1.9, 3.3 et 4% respectivement pour les mortiers ternaire (PZ/MP=1) de 10, 15, 20, 30 et 40%. Contrairement au mortier binaire qu'on a pas pu aller au-delà de 15% de substitution de pouzzolane, l'ajout de la poudre de marbre à permis d'utiliser une quantité supplémentaire de pouzzolane, (jusqu'à 20%) et donné des mortiers plus fluide, et cela est dû à l'effet de dilution donné par la poudre de marbre.

La substitution simultanée par la pouzzolane et la poudre de marbre avec un rapport

PZ/MP=1/3 a montrer une meilleure efficacité. L'augmentation de la quantité d'ajout jusqu'à 50% pour le deuxième système a permis d'avoir des rapport E/C élevée (effet de dilution), est par conséquent des mélanges plus fluide. L'étalement a augmenté de l'ordre de 3 à 7%. Ce type de système a donner la possibilité de substituer jusqu'à 50% de ciment.

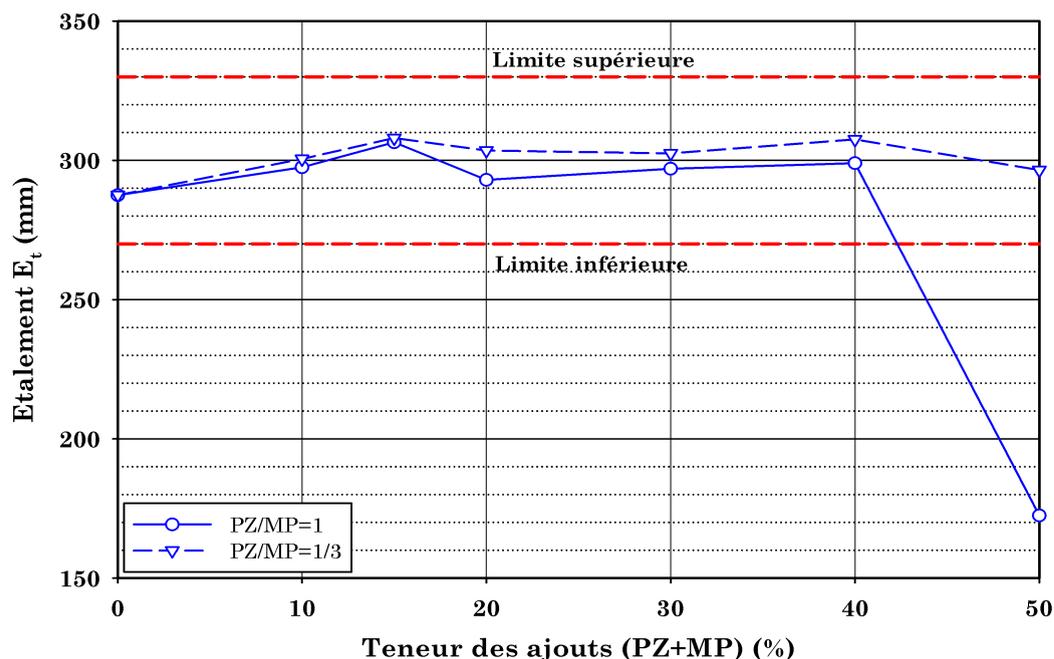


Figure 3.14 – Étalement par mini-cône du mortier ternaire

3.7.2 Temps d'écoulement par V-funnel pour les mortiers ternaires

La figure 3.15 montre la variation du temps d'écoulement par V-funnel pour les mortiers en fonction de la teneur en pouzzolane et en poudre de marbre.

La combinaison de la pouzzolane naturelle et la poudre de marbre a réduit le temps d'écoulement et par conséquent la réduction de la viscosité des mélanges. Le temps d'écoulement varie de 2.8s à 3.9s pour le système ternaire (PZ/MP=1), et de 2.8s à 3.5s pour le système ternaire (PZ/MP=1/3). Ces valeurs sont aussi satisfaisantes pour les limites de 2s à 10s proposé par Domone [97].

On constate que l'incorporation de la pouzzolane naturelle et la poudre de marbre à diminué la viscosité des mélanges, ce qui traduit par des temps d'écoulements par V-funnel faible par rapport au mortier de référence, à l'exception de mortier contenant 50% de substitution pour le premier système.

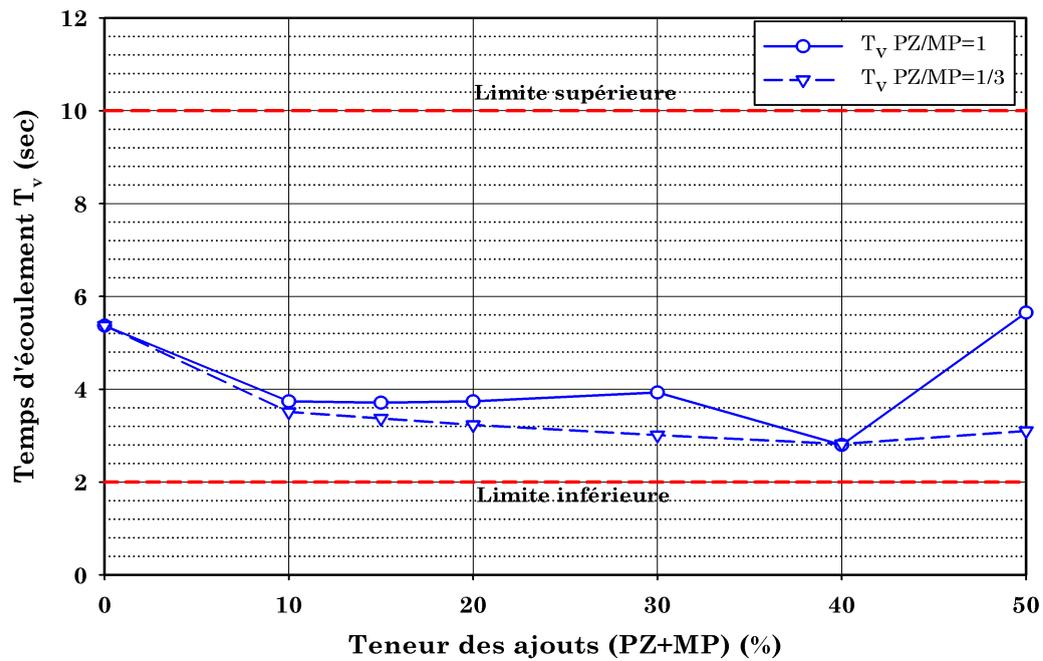


Figure 3.15 – Temps d'écoulement par mini V-funnel du mortier ternaire

3.8 Béton autoplaçant ternaire

Les compositions et les résultats des différents essais sur l'ouvrabilité de douze bétons testés avec comme béton de référence le BAP1 qui contient 0% des ajouts, sont regroupés dans les tableaux 3.8, 3.9, 3.10 et 3.11 donnent.

Tableau 3.8 – Compositions des bétons ternaire avec un rapport PZ/MP=1

		PZ/MP=1						
		BAP1	BAP2	BAP3	BAP4	BAP5	BAP6	BAP7
Ciment (C)	(kg/m ³)	475	427	403	379	333	285	237
	(%)	100	90	85	80	70	60	50
Pouzzolane (PZ)	(%)	0	5	7.5	10	15	20	25
	(kg/m ³)	0	24	36	48	71	95	119
Poudre de marbre (MP)	(%)	0	5	7.5	10	15	20	25
	(kg/m ³)	0	24	36	48	71	95	119
Gravier (3/8)	(kg/m ³)	276.67						
Gravier (8/15)	(kg/m ³)	553.33						
Sable	(kg/m ³)	885.9						
Eau	(kg/m ³)	190						
Sp/L	(%)	0.9						
	(kg/m ³)	4.27						

Tableau 3.9 – Compositions des bétons ternaire avec un rapport PZ/MP=1/3

		PZ/MP=1/3						
		BAP1	BAP8	BAP9	BAP10	BAP11	BAP12	BAP13
Ciment (C)	(kg/m ³)	475	427	403	379	333	285	237
	(%)	100	90	85	80	70	60	50
Pouzzolane (Pz)	(%)	0	2.5	3.75	5	7.5	10	12.5
	(kg/m ³)	0	12	18	24	36	48	60
Poudre de marbre (MP)	(%)	0	7.5	11.25	15	22.5	30	37.5
	(kg/m ³)	0	36	54	72	107	142	178
Gravier (3/8)	(kg/m ³)	276.67						
Gravier (8/15)	(kg/m ³)	553.33						
Sable	(kg/m ³)	885.9						
Eau	(kg/m ³)	190						
Sp/L	(%)	0.9						
	(kg/m ³)	4.27						

Tableau 3.10 – Résultats des essais d'ouvrabilité sur bétons ternaire (PZ/MP=1)

		PZ/MP=1						
		BAP1	BAP2	BAP3	BAP4	BAP5	BAP6	BAP7
Ciment C	(%)	100	90	85	80	70	60	50
Pouzzolane PZ	(%)	0	5	7.5	10	15	20	25
Poudre de Marbre MP	(%)	0	5	7.5	10	15	20	25
Essai d'étalement	T ₅₀₀ (sec)	1.15	0.67	1.66	1.30	1.28	1.48	–
	E _t (mm)	760	802	768	753	743	710	345
Essai J-ring	T ₅₀₀ (sec)	3.18	3.32	3.29	3.36	3.24	3.20	–
	E _t (mm)	755	717	704	689	672	655	–
	B _j (mm)	8.00	14.00	16.00	14.25	19.00	20.00	–
Essai V-funnel	T _V (sec)	6.08	8.04	7.94	8.07	7.25	7.12	–
Essai de stabilité à tamis	Laitance (%)	8.84	2.17	7.41	3.83	0.845	1.00	0.00
Essai L-box	H ₂ /H ₁ (%)	92.78	84.81	82.31	88.60	87.34	44.95	–
	T ₂₀₀	0.83	0.72	0.98	0.85	1.11	0.63	–
	T ₄₀₀	0.90	2.11	1.20	1.40	1.63	1.14	–

L'effet combiné de la pouzzolane et la poudre de marbre sur l'ouvrabilité des bétons autoplaçants à l'état frais est analysé à travers une série d'essais particuliers aux BAP, qui nous permettent d'étudier la variation de l'ouvrabilité en fonction du dosage du mélange en pouzzolane et la poudre de marbre.

Tableau 3.11 – Résultats des essais d’ouvrabilité sur bétons ternaire (PZ/MP=1/3)

		PZ/MP=1/3						
		BAP1	BAP2	BAP3	BAP4	BAP5	BAP6	BAP7
Ciment C	(%)	100	90	85	80	70	60	50
Pouzzolane PZ	(%)	0	2.5	3.75	5	7.5	10	12.5
Poudre de Marbre MP	(%)	0	7.5	11.25	15	22.5	30	37.5
Essai d'étalement	$T_{500}(sec)$	1.15	0.81	0.90	0.94	0.93	1.97	1.24
	$E_t(mm)$	760	826	820	815	785	802.5	788
Essai J-ring	$T_{500}(sec)$	3.18	3.06	2.98	2.71	3.00	3.16	3.34
	$E_t(mm)$	755	763	760	756	741	744	743.5
	$B_j(mm)$	8.00	8.15	8.45	8.50	12.75	7.53	6.00
Essai V-funnel	$T_V(sec)$	6.08	5.25	4.62	4.27	5.18	5.92	6.90
Essai de stabilité à tamis	Laitance (%)	8.84	8.65	10.43	12.06	14.46	6.78	4.07
Essai L-box	$H_2/H_1(%)$	92.78	88.75	90.97	93.50	92.4	91.25	78.82
	T_{200}	0.83	0.84	0.64	0.63	0.6	0.63	1.03
	T_{400}	0.90	1.13	0.79	0.78	0.75	0.77	1.47

3.8.1 Etalement au cône d’Abrams

La figure 3.16 présente la variation de l'étalement en fonction de la teneur en pouzzolane et en poudre de marbre.

On remarque que la substitution du ciment jusqu'à 15% de teneur en pouzzolane et en poudre de marbre pour le système ternaire (PZ/MP=1) améliore légèrement l'étalement par rapport au BAP de référence. Par contre l'amélioration de l'étalement est observée nettement pour le système (PZ/MP=1/3) jusqu'à un taux de 50%. Cependant, l'optimum pour les deux systèmes semble être 10% de substitution. Nous remarquons que les valeurs d'étalement pour le système PZ/MP=1 avec une teneur en ajout supérieure à 15% représentent des étalements acceptables de 753 mm, 743 mm et 710 mm pour des teneurs de 20, 30 et 40%.

On peut conclure que la combinaison de pouzzolane et la poudre de marbre à apporté un nette gain sur l'ouvrabilité du BAP jusqu'à 50% pour les deuxième système PZ/MP=1/3. Par contre, l'amélioration est observé jusqu'à 15% pour le système PZ/MP=1. Ces valeurs d'étalement sont dans les limites préconisées par EFNARC (550 à 850 mm).

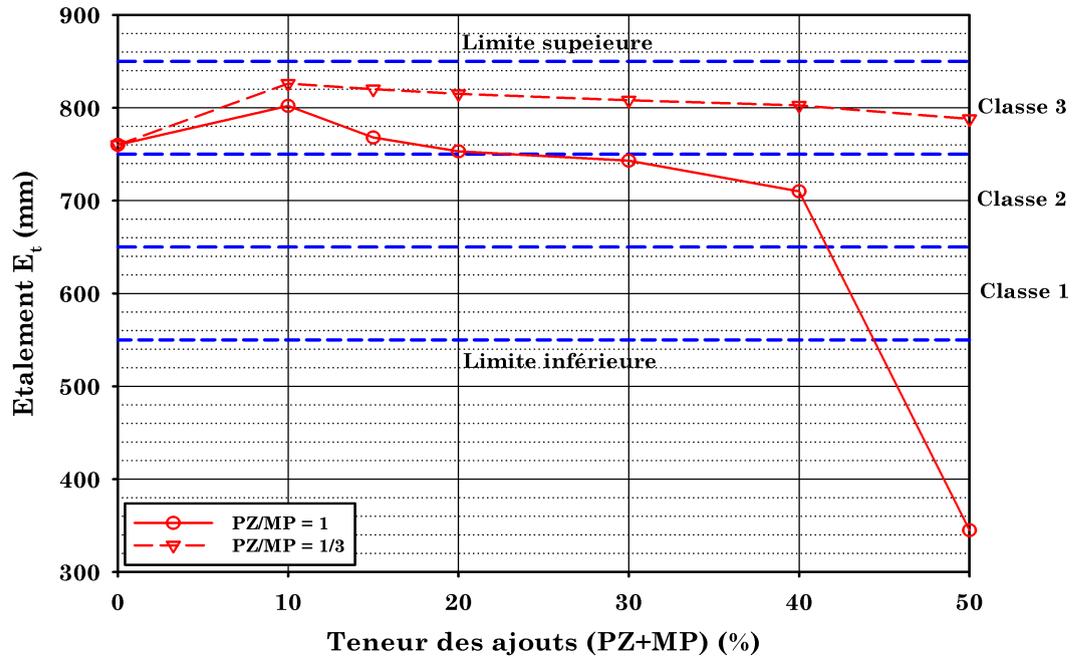


Figure 3.16 – Etalement des bétons ternaire

3.8.2 Temps d'écoulement par l'essai d'entonnoir en V (V-Funnel)

Les résultats de variation du temps d'écoulement à l'essai d'entonnoir (V-Funnel) en fonction du pourcentage de pouzzolane et en poudre de marbre sont représentés dans la Figure 3.17.

Pour le premier système (PZ/MP=1), le temps d'écoulement présente un optimum maximal de l'ordre de 8 sec avec des teneurs qui varient de 10 à 20%. Ceci signifie que la viscosité de mélange a augmenté à cause des faibles teneurs en poudre de marbre. Au-delà de 20% de substitution du ciment le temps diminue avec l'augmentation des ajouts jusqu'à 40%.

Pour le deuxième système (PZ/MP=1/3), la variation représente un optimum minimal à 20% de substitution. Il faut noter que toutes les valeurs du temps sont à l'intérieur de l'intervalle proposé par Domone [97], à l'exception de celle du premier système (PZ/MP=1) avec une teneur de 50% d'ajout un blocage a été constaté.

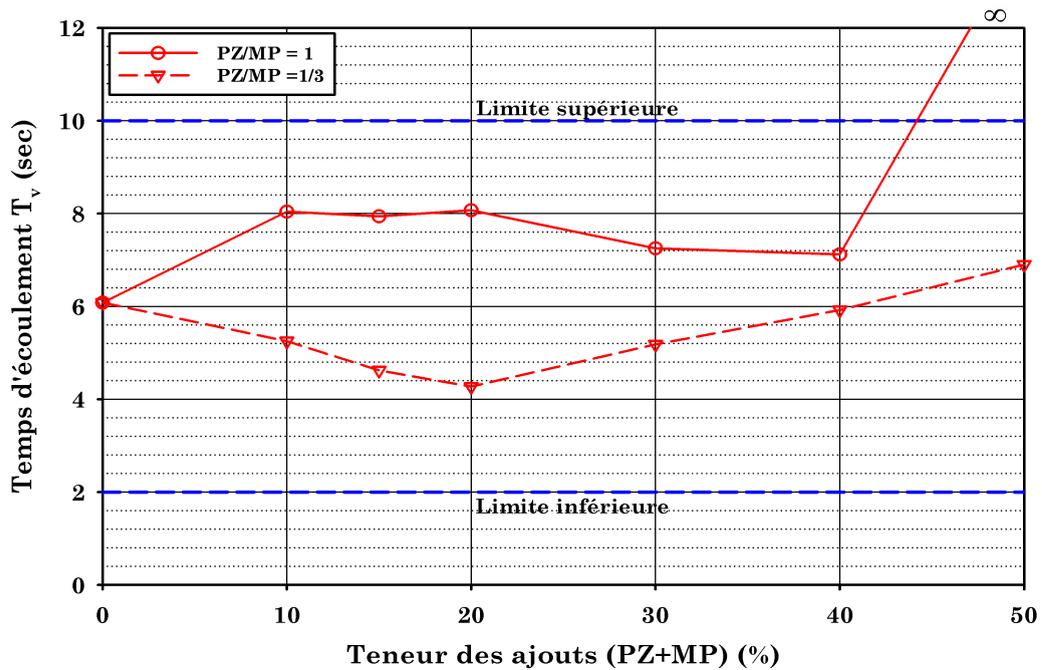


Figure 3.17 – Temps d'écoulement à l'entonnoir en V des bétons ternaires

3.8.3 Capacité de remplissage par l'essai de la Boîte en L (L-Box)

La variation du rapport H_2/H_1 en fonction du pourcentage de pouzzolane est représentée dans la figure 3.18.

On remarque que la substitution du ciment par la pouzzolane naturelle et la poudre de marbre n'a pas affecté la capacité de remplissage et par conséquent le rapport H_2/H_1 qui varie de 82 à 89% pour le premier système, et de 89 à 94% pour le deuxième système. On remarque aussi qu'au-delà de 30% de substitution pour le premier système (PZ/MP=1) le rapport H_2/H_1 diminue d'une manière considérable pour le mélange avec 40% d'ajouts. Un blocage a été observé pour le mélange avec 50% d'ajouts, probablement en raison de la présence de grande quantité de pouzzolane. Par contre, pour le deuxième système (PZ/MP=1/3), le rapport H_2/H_1 reste dans la limite exigé par EFNARC, ($\geq 80\%$) pour un taux inférieur à 40% des ajouts, et légèrement inférieur à 80% pour un taux de 50% de substitution.

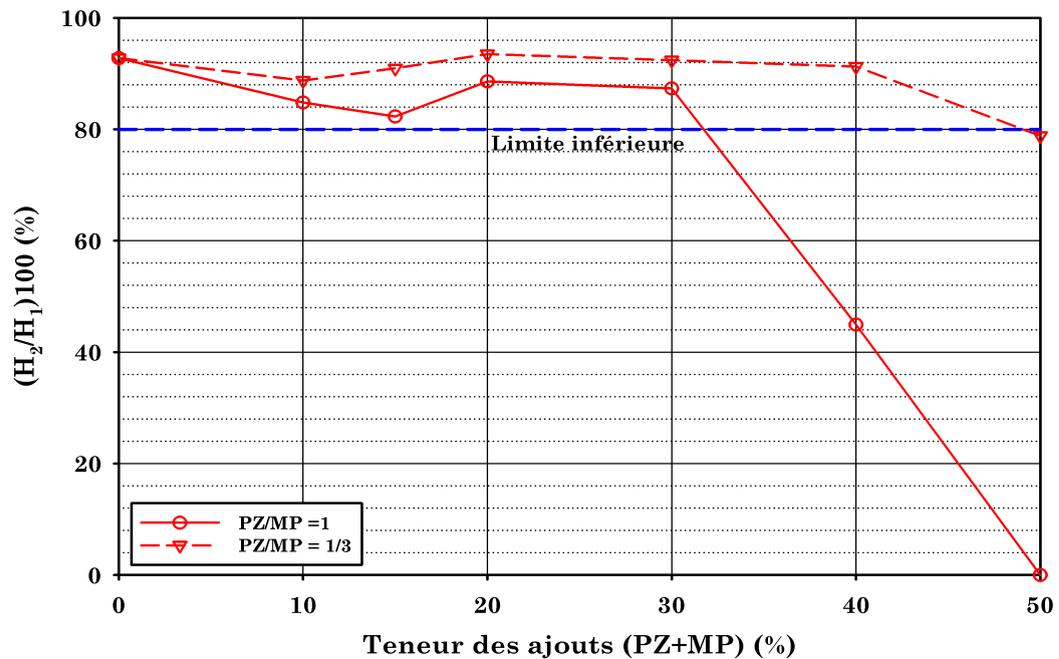


Figure 3.18 – Capacité de remplissage des bétons ternaire par la boîte en L

3.8.4 Essai de J-Ring

Dans ces essais, nous analysons l'effet de la présence des armatures sur l'étalement des galettes des BAP. La figure 3.19 présente l'effet des pourcentages d'ajouts sur l'étalement et la figure 3.20 présente la différence d'hauteurs entre le milieu et l'extérieur de J-Ring. Pour le premier système de substitution (PZ/MP=1), on remarque que la combinaison de deux ajouts a diminuer l'étalement de l'ordre de 5, 7, 9, 11 et 13% respectivement pour les mélanges de 10, 15, 20, 30 et 40%. Cette diminution n'a pas affecter l'étalement de sorte quelle soit à l'extérieur des limites recommandées, à l'exception du mélange avec 50% de substitution où un blocage à été constaté. Cette diminution semble être dûe à la présence des quantités importante de pouzzolane naturelle qui probablement consomme beaucoup d'eau et de superplastifiant.

Pour le deuxième système (PZ/MP=1/3) la substitution avec la poudre de marbre et la pouzzolane naturelle a gardé l'étalement presque constante avec un légère avantage pour 10% de substitution. On remarque aussi que ce système de substitution est meilleur par rapport au premier système car on a utilisé des quantités d'ajout en plus (jusqu'à 50%) et l'étalement avec le J-Ring reste dans la fourchette préconaisée, et cela est du probablement à l'effet de la poudre de marbre sur la seuil de cisaillement et la viscosité de mélange.

La différence d'hauteurs augmente d'une manière considérable pour le système de substitution (PZ/MP=1). La variation de B_j est de 14 mm à 20 mm pour un taux de substitution à 10 à 40%.

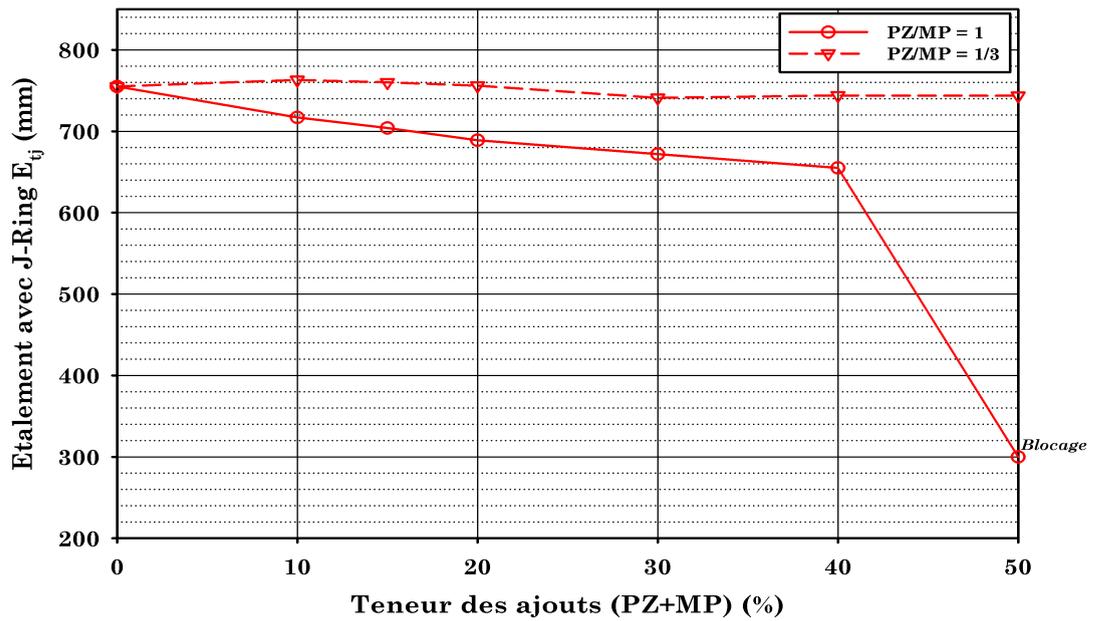


Figure 3.19 – Etalement avec J-Ring pour les bétons ternaire

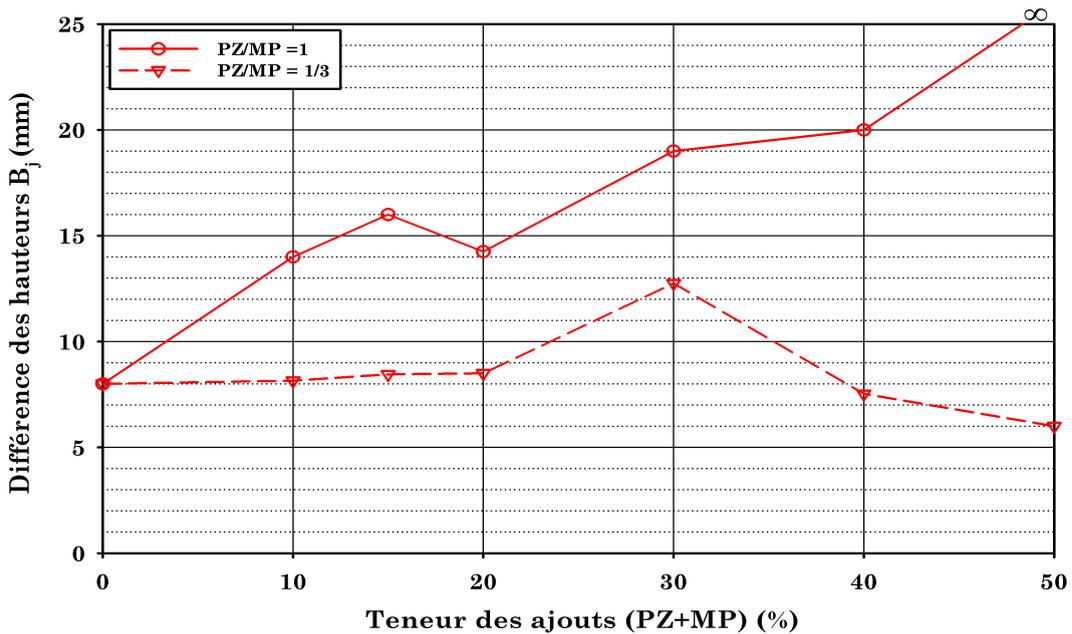


Figure 3.20 – Différence d'hauteurs (J-Ring) pour les bétons ternaire

Par contre pour le système (PZ/MP=1/3) la quantité élevée de la poudre de marbre améliore la capacité de passage et les valeurs de B_j sont inférieures à 14 mm.

3.8.5 Stabilité au Tamis

Les valeurs de la stabilité à tamis sont présentées dans le tableau 3.5 et la figure 3.21. On remarque que les valeurs de laitance des BAP ternaires sont inférieures aux limites maximales exigées par les différents recommandations ($\leq 15\%$) [40].

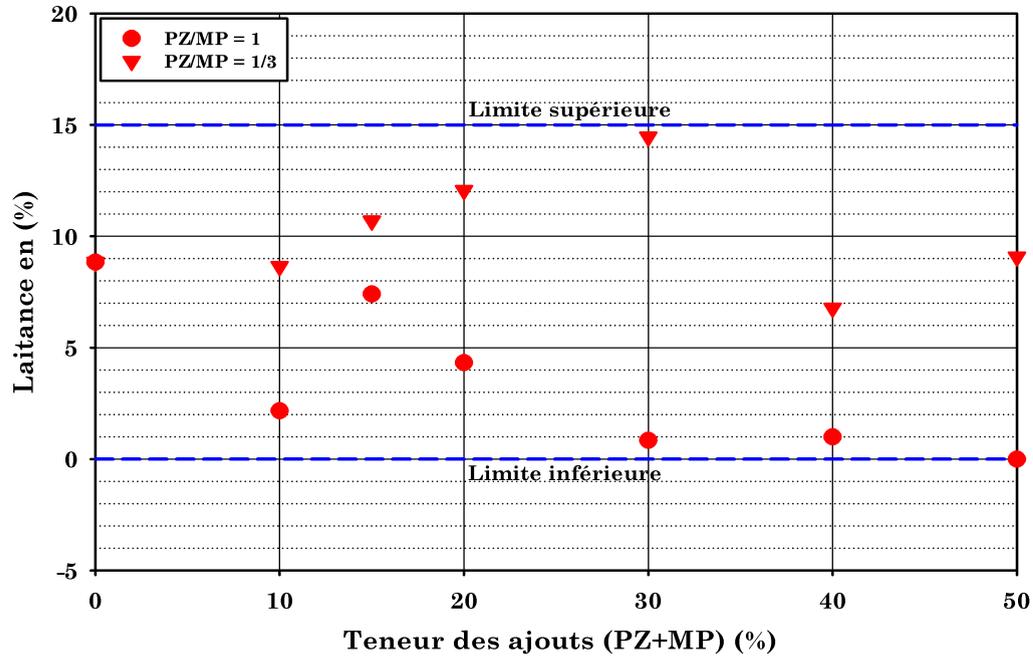


Figure 3.21 – Stabilité à tamis pour les bétons ternaires

Les mélanges du béton avec un système PZ/MP=1 présentent des faibles valeurs de laitance, donc la présence de la pouzzolane avec des quantités élevées rend le béton plus visqueux et stable à la ségrégation. Par contre, les mélanges du béton avec un système PZ/MP=1/3 présentent des pourcentages de laitance élevées par rapport au premier système, et les BAP sont moins visqueux et moins stables.

SYNTHÈSE DE L'ÉTUDE RHÉOLOGIQUE

Cette étude a traité le comportement à l'état frais des mortiers (MAP) et des bétons autoplaçants (BAP). Les propriétés à l'état frais ont été déterminées à l'aide du mini cône et du mini V-funnel pour les mortiers et par le cône d'Abrams, le J-ring, le V-Funnel, le L-Box et l'essai de stabilité à tamis pour les BAP.

L'influence des additions minérales telles que la pouzzolane naturelle et la poudre de marbre sur le comportement rhéologique est suivie.

On constate que le comportement rhéologique des mortiers semble être similaire à celui des bétons autoplaçant ce qui donne une bonne corrélation entre les deux du point de vue formulation. Donc, la possibilité d'utilisation de la méthode Okamura dans la formulation avec un ajustement dans le pourcentage de sable dans les mortiers au lieu 40% proposé par Okamura on a trouvé qu'on doit utiliser 50% de rapport S/M.

L'introduction de la pouzzolane naturelle dans les mortiers et les bétons autoplaçants a amélioré le comportement rhéologique jusqu'à 15% de substitution de pouzzolane naturelle. Au-delà de cette valeur tous les résultats des essais sur l'ouvrabilité sont inacceptables.

La substitution du ciment avec des teneurs de poudre de marbre de 5 à 30% a apporté un effet bénéfique sur le comportement rhéologique des mortiers autoplaçant.

Afin d'améliorer le comportement rhéologique de mortiers et bétons autoplaçants binaire, on a opté à l'incorporation de la pouzzolane naturelle avec la poudre de marbre ensemble (ciment ternaire), et cela pour des raisons techniques et économiques.

Les résultats obtenus par les MAP et BAP sont encourageantes, car on remarque une amélioration de comportement rhéologique par rapport au mortier et béton binaire à base de pouzzolane naturelle avec l'utilisation de deux systèmes de substitutions ($PZ/MP=1$ et $PZ/MP=1/3$). On constate aussi l'augmentation de pourcentage d'ajout maximale (pouzzolane+poudre de marbre) est prolongé entre 40 à 50% ce qui permis de fabrication

des bétons autoplaçants à faible impact environnementale.

CHAPITRE 4

COMPORTEMENT PHYSICO-MÉCANIQUE DES BÉTONS

AUTOPLAÇANTS

4.1 Introduction

Le présent chapitre présente l'analyse et résultats sur les mortiers et bétons à base des ciments Portland binaires et ternaires. La première partie présente l'évaluation de l'effet de ces ajouts minéraux sur la chaleur d'hydratation du mortier, mesurée à l'aide d'un calorimètre semi-adiabatique LANGAVANT. La deuxième partie s'intéresse à l'analyse des résultats des essais mécaniques effectués à différents âges.

4.2 Caractéristiques chimiques des ajouts

4.2.1 Analyse chimique de la pouzzolane naturelle

D'après le tableau 4.1 l'analyse chimique de la pouzzolane obtenue par broyage montre clairement que les principaux oxydes sont : SiO_2 , Al_2O_3 et Fe_2O_3 .

Tableau 4.1 – Caractéristiques chimiques de la pouzzolane naturelle

Oxydes (%)	SiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	CaO	MgO	Na_2O_3	K_2O	SO_3
Pouzzolane naturelle	46.8	18.8	10.5	9.2	3.8	0.8	0.5	0.2

Les pouzzolanes naturelles sont essentiellement composées de silice SiO_2 , d'alumine Al_2O_3 et d'oxyde ferrique Fe_2O_3 . La somme des trois oxydes $\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$ est de 76%. Cette valeur est supérieure à 70% et est conforme à la norme ASTM C 618-03 [121].

4.2.2 Analyse DRX de la pouzzolane naturelle et de la poudre de marbre

Afin d'examiner les structures de la pouzzolane et la poudre de marbre, des échantillon sont soumis à l'analyse par diffraction aux rayons X (DRX). Les diffractogrammes des échantillons sont présentés dans les figures 4.1 et 4.2. L'analyse de la diffraction aux rayons X (DRX) de la pouzzolane montre qu'elle est constituée de minéraux cristallins riches en silice, alumine, fer et magnésium (Quartz, Corderite, Hematite, Analcine, Axinite, Pyroxène), et que la poudre de marbre est constituée principalement de calcite avec quelque traces de quartez et de dolomite.

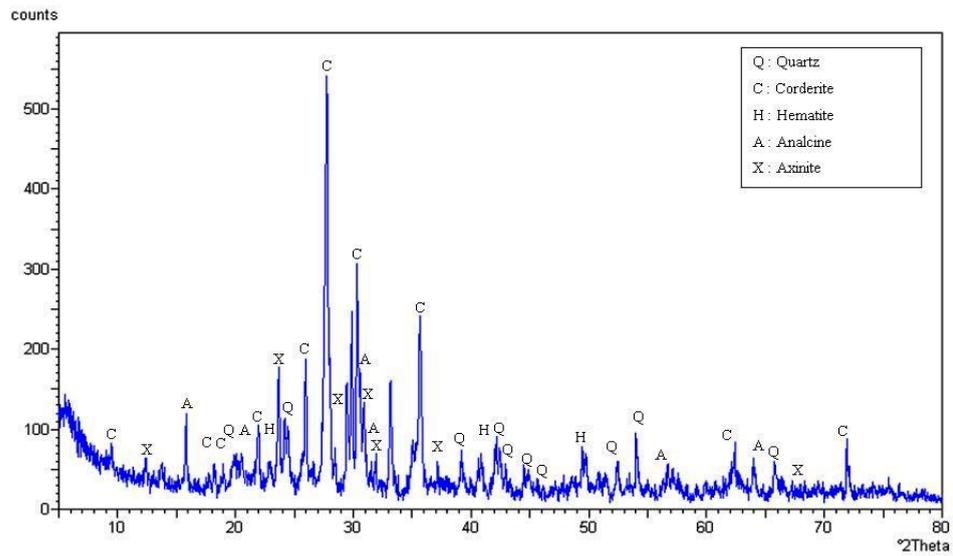


Figure 4.1 – Spectres de diffraction aux rayons X de la pouzzolane naturelle

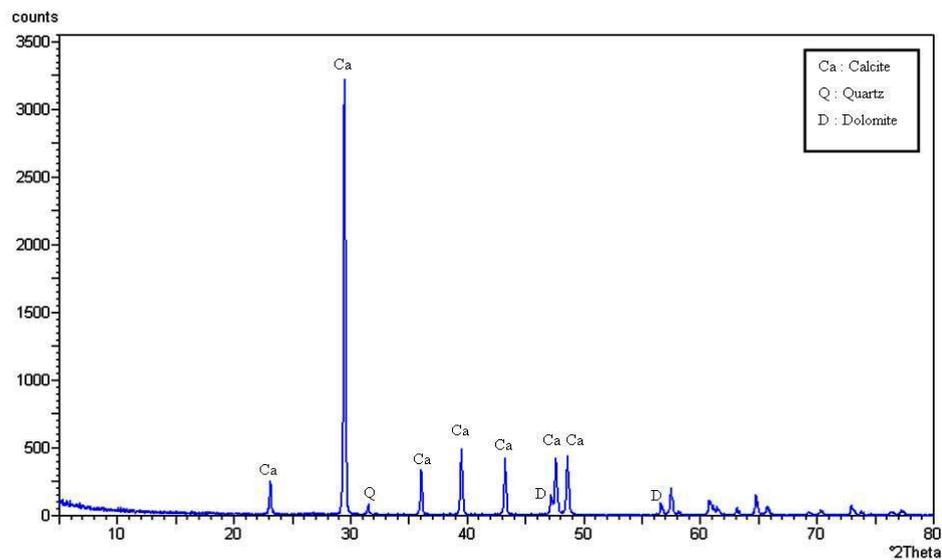


Figure 4.2 – Spectres de diffraction aux rayons X de la poudre de marbre

4.2.3 Morphologie des grains de la pouzzolane naturelle et la poudre de marbre

Pour avoir une idée sur l'état des grains de pouzzolane ou la poudre de marbre on a opté l'utilisation du microscope électronique à balayage. les essais sont effectuées au Laboratoire de mécanique et matériaux de génie civil L2MGC à l'université Cergy Pontoise en France (cf. Figure 4.3).



Figure 4.3 – Microscope électronique à balayage

Les structures morphologiques, déterminées par microscope, de la pouzzolane naturelle et de la poudre de marbre sont présentée dans les figure 4.4 et 4.5. D'après la Figure 4.4 on constate que la morphologie de la poudre de pouzzolane naturelle est assez angulaire, est cela est probablement dû à la technique de broyage par les chocs des billes de Micro Deval. On voit bien que la pouzzolane naturelle représente des granulométrie variée ce qui permet d'avoir un maximum de compacité granulaire.

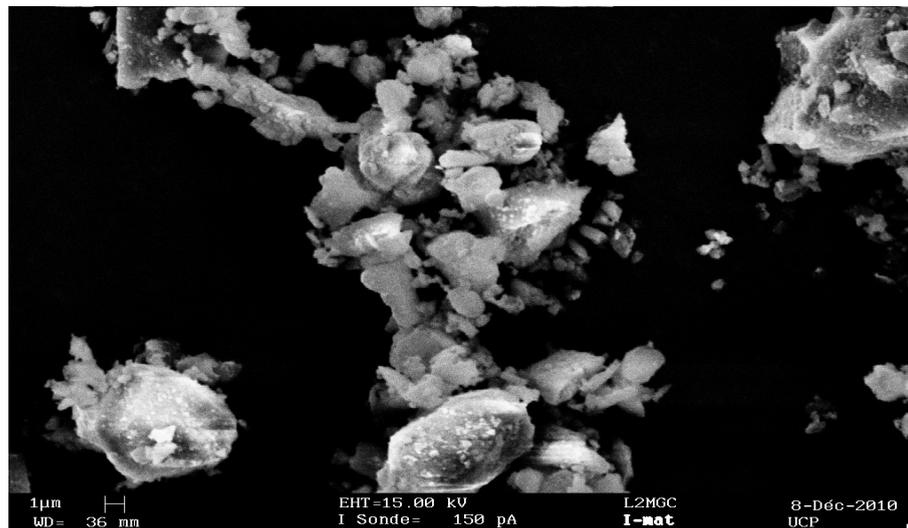


Figure 4.4 – Analyse de la pouzzolane naturelle par microscope électronique à balayage

D'après la Figure 4.5 on constate que la granulométrie de la poudre de marbre est assez uniforme par rapport à la pouzzolane naturelle, est cela est dû probablement à la méthode de l'obtention de cette matière au niveau de l'industrie de fabrication de marbre.

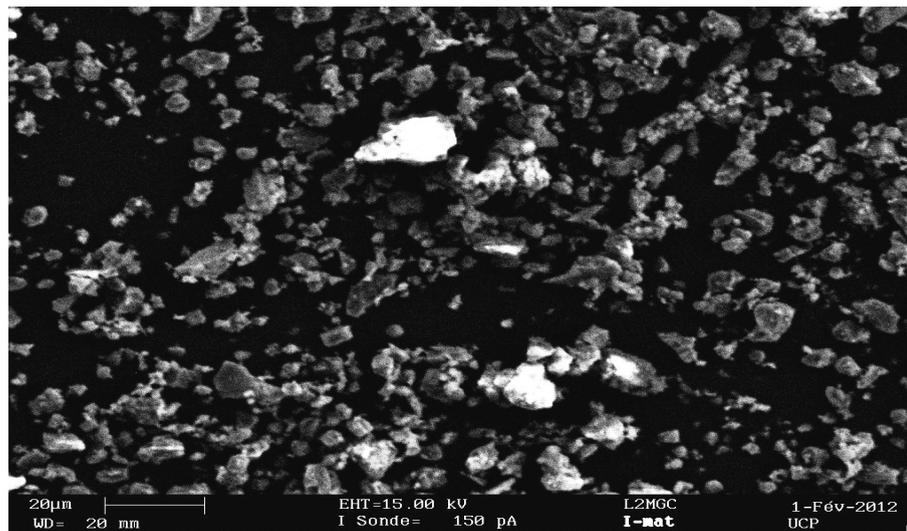


Figure 4.5 – Analyse de poudre de marbre par microscope électronique à balayage

4.3 Effet de pouzzolane naturelle sur la chaleur d'hydratation

Les mesures des variations des températures à l'aide d'un calorimètre semi-adiabatique pour les mortiers à base des ciments binaires (C+PZ), sont présentées dans le tableau B.1 dans l'annexe B. La figure 4.6 montre la variation de température en fonction du temps, pendant 97 heures pour les cinq mortiers autoplaçants.

Au vu des résultats, on peut voir une diminution de température en fonction de taux de substitution par la pouzzolane naturelle. La température atteint son maximum de l'ordre de 46 °C pour des teneurs de 0 et 5% de pouzzolane, à environ 28 heures après le malaxage. Dans le cas de 10% et 15% de pouzzolane, le maximum respectivement est de 42.09 et 44.30 °C est environ 26 heures. Boukendakdji [24] a montré que la température maximale est de 52 et 50.6 °C a été obtenue à 32 heures après le malaxage pour des mélanges contenant respectivement 0 et 10% de laitier. Par contre, pour le mélange avec 15% de laitier la température diminue jusqu'à une valeur de 46.4 °C est la pic de température est obtenu à 38 heures après le malaxage. Paine et al [122] ont trouvé des résultats similaires. Ils ont montré que la chaleur d'hydratation augmente avec l'augmentation de la finesse du laitier et qu'elle diminue avec l'augmentation du pourcentage de laitier présent dans le mélange. La faible chaleur d'hydratation des ciments au laitier montre que ces derniers peuvent être utilisés dans des structures en grandes masses de béton tels que les murs de soutènement.

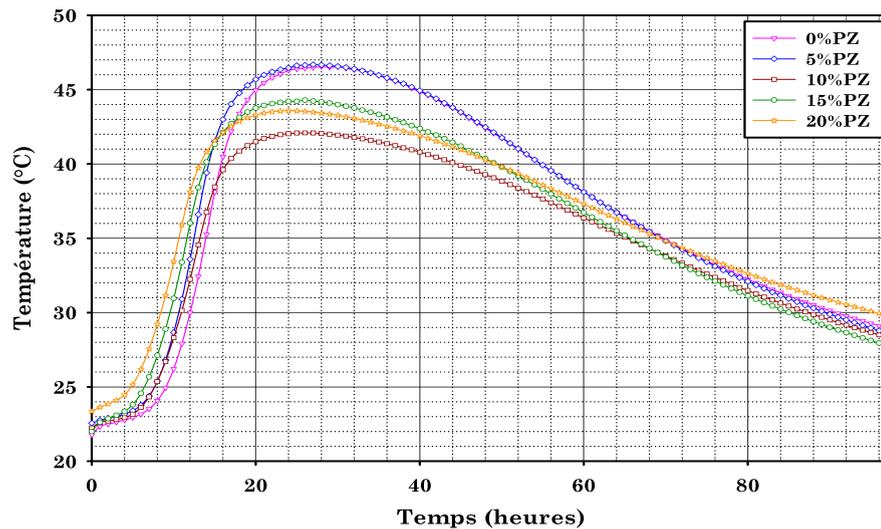


Figure 4.6 – Variation de la température des mortiers binaires

On remarque aussi que l'introduction de 20% de la pouzzolane a diminué la température jusqu'à 43.58 °C à environ 24 heures. L'introduction de la pouzzolane naturelle à partir de 10% fait diminuer la température maximale à l'intérieur du mélange. Cependant, l'introduction progressivement de la pouzzolane naturelle semble avancer l'apparition du pic d'hydratation et diminue la phase dormante d'hydratation.

Le banc d'essai comporte deux calorimètres semi adiabatiques dont les thermocouples sont reliés à une chaîne de mesure. Pour calculer la chaleur dégagée on doit mesurer l'échauffement de l'éprouvette $\Delta\theta$ et connaître la capacité thermique du calorimètre vide et avec l'éprouvette d'où on obtient la chaleur dégagée par l'expression suivante [105] :

$$Q = \frac{C}{m_c} \Delta\theta_t + \frac{1}{m_c} \int_0^t \alpha \cdot \Delta\theta_t \cdot dt \quad (4.1)$$

La figure 4.7 présente la variation de la quantité de chaleur dans le mortier en fonction du temps. La plus faible quantité de chaleur est donnée par le mélange contenant 10% de pouzzolane. On remarque aussi que les autres mélanges dégagent des quantités de chaleur plus élevées que celles du mélange de référence (0% de pouzzolane). Par contre, tous les mortiers à base de pouzzolane naturelle dégagent des quantités de chaleur supérieures à celles du mortier de référence pour les premières 18 heures (cf. Figure 4.8).

Kadri et al [123, 124] ont montré que la réaction pouzzolanique apparaît tôt et joue un rôle important dans les propriétés du béton. L'ajout de la fumée de silice et le métakaolin augmente le dégagement de chaleur total au cours des 24 premières heures. L'utilisation de la fumée de silice et le métakaolin dans les mortiers a contribué à la diminution de la période dormante et cela est dû à la grande surface spécifique assurée par ces ajouts.

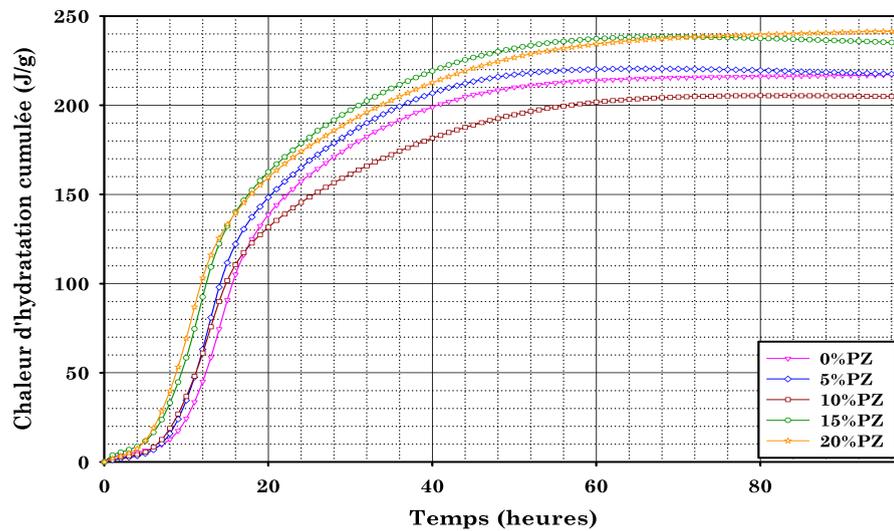


Figure 4.7 – Variation de la chaleur d'hydratation cumulée des mortiers binaires

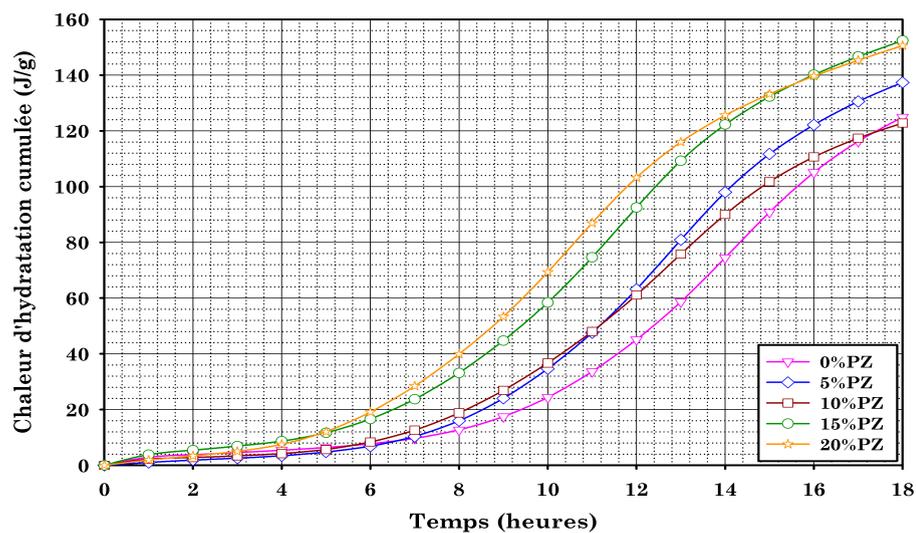


Figure 4.8 – Variation de la chaleur d'hydratation cumulée du mortier binaire pour les premiers 18 heures

La variation de flux de chaleur en fonction du temps pour différentes contenances en pouzzolane naturelle est représenté sur la figure 4.9. Le flux de chaleur de mortier à base de pouzzolane présente des courbes typiques de flux de chaleur avec deux pics. Le premier pic correspond à la première réaction, lors du malaxage du ciment avec l'eau. Le premier pic est suivi par une période dormante avec un très faible flux de chaleur accompagné par une saturation en chaux. Après cette période une accélération commence

avec la précipitation de la portlandite, et le flux de chaleur augmente rapidement jusqu'à atteindre la second pic qui est le principal pic avec la formation de hydrosilicate et de l'ettringite additionnelle [125].

La figure 4.9 montre que l'addition de la pouzzolane naturelle accélère l'apparition du pic principale plus vite que celui de mortier de référence (0% de pouzzolane). La substitution de ciment avec 10% de pouzzolane réduit le flux de chaleur est augmente la longueur de la période dormante. Pour les mortiers contenant plus de 10% de la pouzzolane les flux de chaleur observés sont nettement plus grands que ceux du mortier de référence.

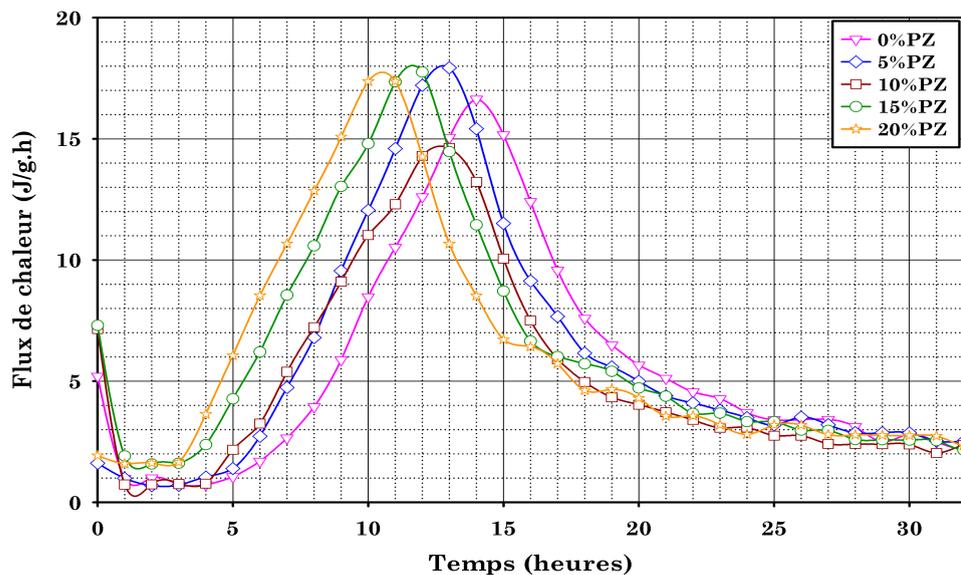


Figure 4.9 – Variation du flux de chaleur des mortiers binaires

Pour voir l'effet de la poudre de marbre sur la cinétique d'hydratation des mortiers autoplaçants on a adopté deux systèmes de substitution.

- Le premier système représente le cas de la substitution du ciment avec une quantité constante de pouzzolane égale de 5% et des quantités varie de poudre de marbre de 5, 10 et 15% ;
- Le deuxième système de substitution est similaire au premier mais avec une quantité de pouzzolane constante de 10% avec des pourcentages de poudre de marbre de 10, 20 et 30% ;

Les figures 4.10 et 4.11 représentent la variation de la température en fonction du temps pour les deux systèmes de substitution.

On remarque que l'ajout de la poudre de marbre a diminuer la température pour les deux systèmes de substitution. On remarque aussi que la diminution de température est nettement plus faible pour les mortiers avec 10% de PZ par rapport aux mortiers avec 5%

de PZ. Cela est dû à la faible quantité de ciment utilisée par rapport au mortier avec 5% de pouzzolane. Le deuxième système de substitution accélère légèrement l'apparition du pic majeur de température par rapport au mortier de référence (0% de pouzzolane).

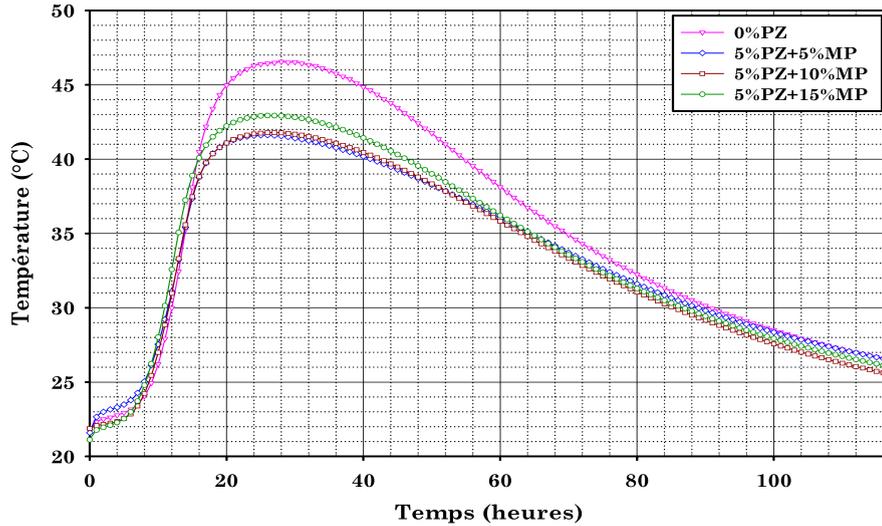


Figure 4.10 – Variation de la température des mortiers ternaires avec 5% de pouzzolane

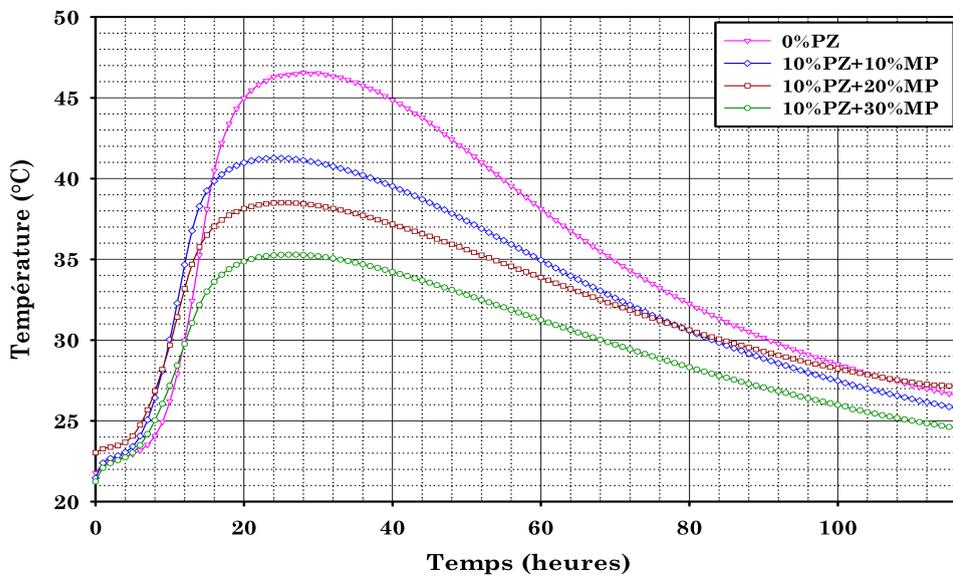


Figure 4.11 – Variation de la température des mortiers ternaires avec 10% de pouzzolane

Les quantités de chaleur cumulées dégagées au cours d'hydratation pendant 116 heures pour les deux systèmes sont montrées sur les figures 4.12 et 4.13.

L'effet combinée de pouzzolane naturelle et la poudre de marbre a diminuer la quantité de chaleur dégagée en fonction du temps pour les mélanges contenant 5%PZ+5%MP et

5%PZ+10%MP par rapport de mélange de référence (0%PZ+0%MP).

A l'exception du mélange contenant 5%PZ+15%MP qui dégage une quantité supérieure à celle du mélange de référence. La diminution de la quantité de chaleur cumulée se traduit par une diminution de la quantité de pores due à l'excès d'eau pendant l'hydratation [126].

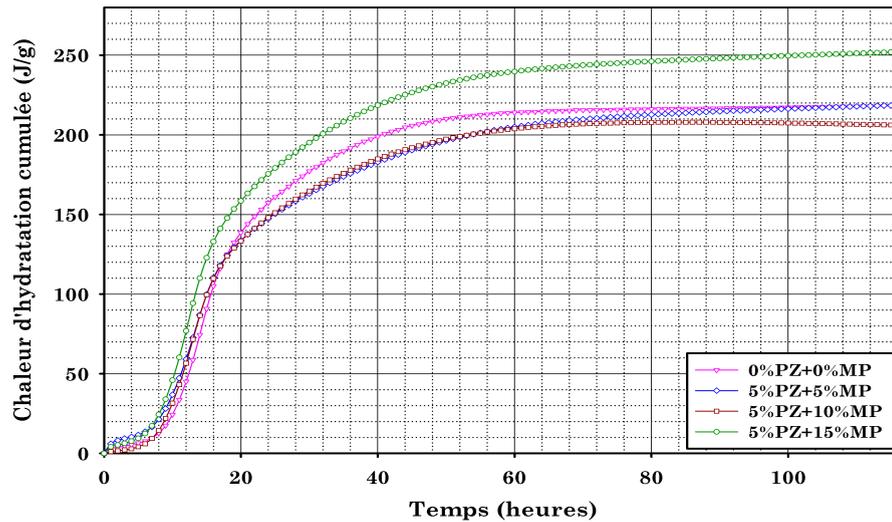


Figure 4.12 – Variation de la chaleur d'hydratation cumulée des mortiers ternaires avec 5% de pouzzolane

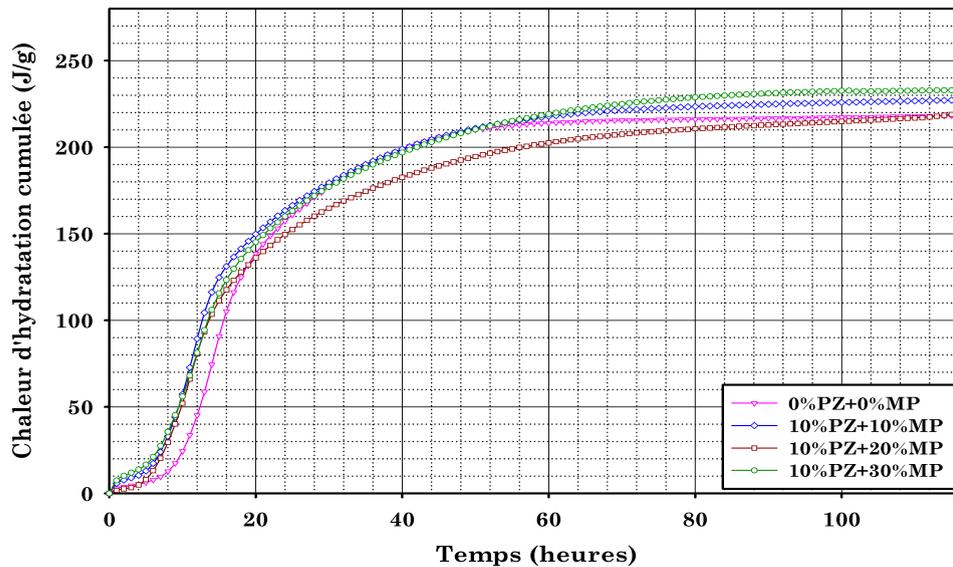


Figure 4.13 – Variation de la chaleur d'hydratation cumulée des mortiers ternaires avec 10% de pouzzolane

Pour le deuxième système l'augmentation de la quantité de pouzzolane jusqu'à 10% avec des quantités de poudre de marbre de 10, 20 et 30% rend les quantités de chaleurs

dégagées comparables à celles de mélange de référence. Une légère augmentation de chaleur est observée si en utilise des quantités supérieures à 10% de la poudre de marbre. L'introduction de la pouzzolane naturelle et la poudre de marbre accélère le processus d'hydratation par rapport au mortier à base de ciment Portland (référence), et cela est clairement montré sur les figures 4.14.(a) et 4.14.(b). De plus on remarque une augmentation proportionnelle de la quantité de chaleur dégagée avec l'augmentation de quantité de poudre de marbre, cela semble être dû à l'effet des additions d'origine calcaire sur la résistance à jeune âge.

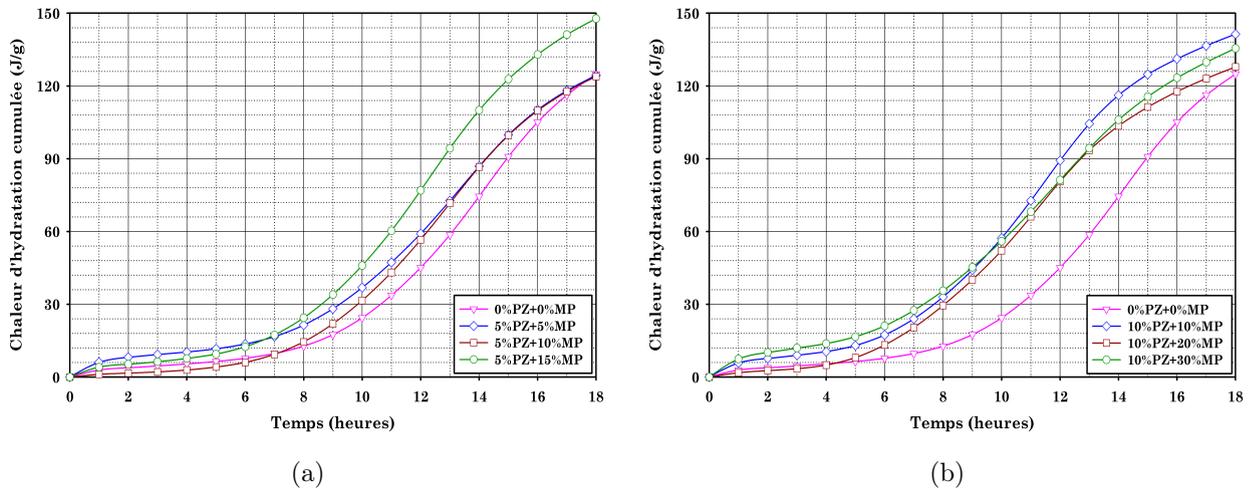


Figure 4.14 – Variation de la chaleur d'hydratation cumulée du mortier ternaire pour les premiers 18 heures

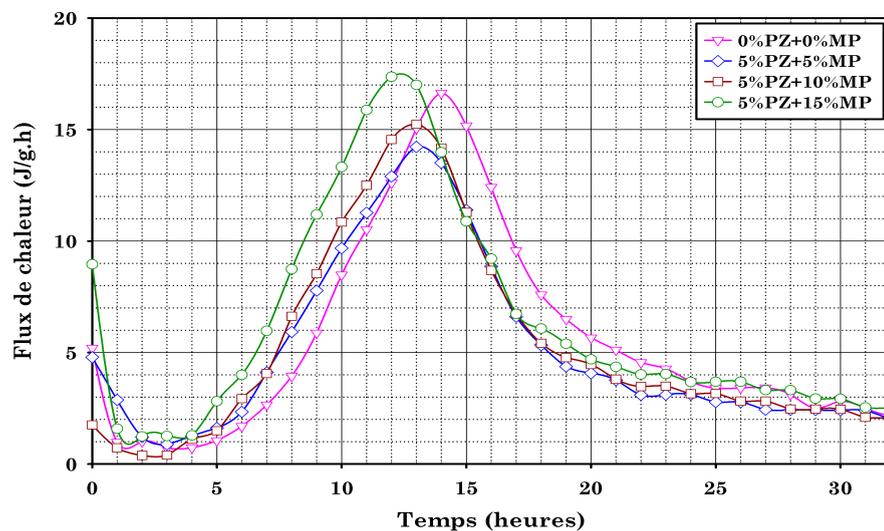


Figure 4.15 – Variation du flux de chaleur des mortiers ternaires avec 5% de pouzzolane

Les variations de flux de chaleur des mortiers ternaires sont illustrées dans les figures

4.15 et 4.16. Pour le premier système (5%PZ+ 5, 10 et 15%MP) de substitution la combinaison d'ajout a favoriser l'apparition du pic majeur (pic de température) en avance à celle du mortier de référence, est par conséquent, la diminution de la période dormante d'hydratation. La substitution du ciment avec la pouzzolane et la poudre de marbre a augmenter la valeur de flux de chaleur proportionnellement aux quantités d'ajouts.

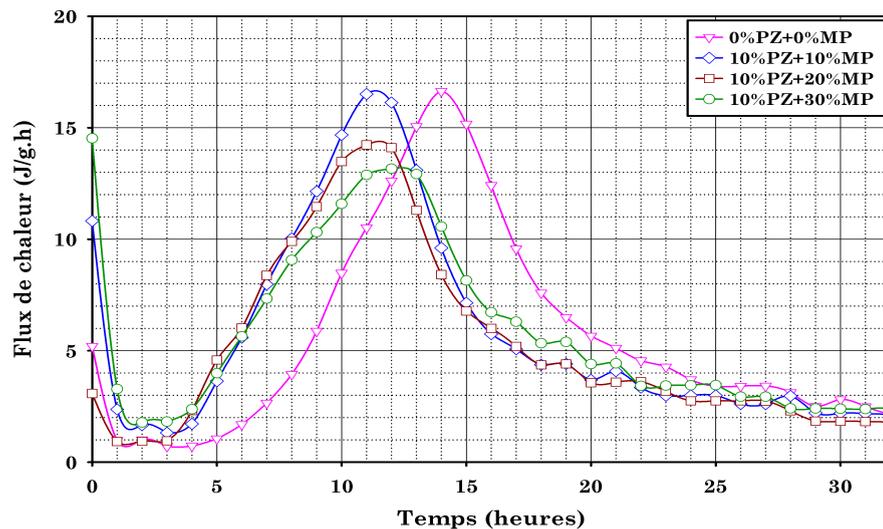


Figure 4.16 – Variation du flux de chaleur des mortiers ternaires avec 10% de pouzzolane

Par contre, pour le deuxième système (10%PZ+ 10, 20 et 30%MP), l'effet combiné de la pouzzolane naturelle et la poudre de marbre a diminuer le flux de chaleur proportionnellement au quantité d'ajouts. Mais l'apparition du pic majeur (pic de température) est toujours en avance par rapport à celui du mortier de référence, ce qui se traduit par la diminution de la période dormante d'hydratation.

4.4 Effet de la pouzzolane sur la résistance à la compression des BAP

Les résultats de la résistance à la compression des bétons autoplaçants binaire à base de pouzzolane naturelle sont résumés dans le tableau 4.2. La figure 4.17 représente la variation de la résistance à la compression des BAP binaire aux différents âges 7, 28, 56, et 90 jours. Les résultats des résistances à la compression des bétons autoplaçants ternaires à base de pouzzolane naturelle et de la poudre de marbre (PZ/MP=1 et PZ/MP=1/3) sont illustrées dans les tableaux 4.3 et 4.4. Cependant la variation de la résistance à la compression sont présentées dans les figures 4.19 et 4.20.

Tableau 4.2 – Résistance à la compression des BAP binaires

Résistance à la compression (MPa)						
Âges (jours)	0%PZ	5%PZ	10%PZ	15%PZ	20%PZ	25%PZ
07	28.42	26.50	26.36	25.52	16.20	17.35
28	37.20	31.57	30.22	27.27	27.27	25.16
56	37.40	37.57	32.93	29.60	28.15	26.52
90	38.95	35.62	33.70	34.45	34.25	33.00

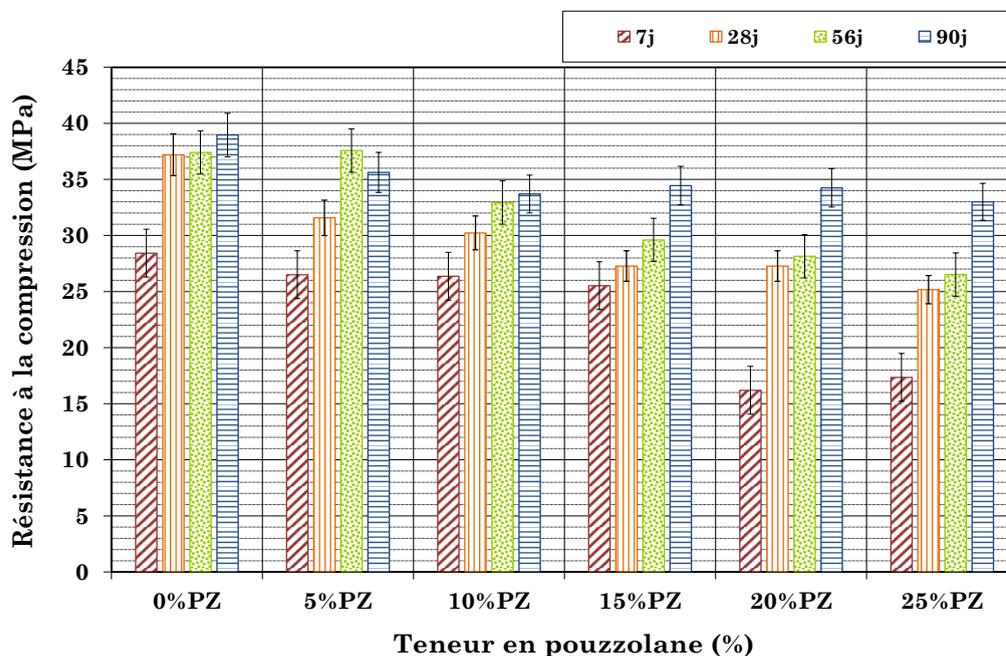


Figure 4.17 – Variation de la résistance à la compression aux différents âges

A l'âge de 7 jours la résistance à la compression semble diminuer en fonction de la quantité de la pouzzolane dans les mélanges, et cela est dû probablement à la faible activité pouzzolane à jeune âge. À 28 jours la diminution de résistance est de l'ordre de 15, 19, 27, 27 et 32% respectivement pour des contenances en pouzzolane de 5, 10, 15, 20 et 25% par rapport au béton de référence. Cette diminution de la résistance à la compression est dû que l'activité pouzzolanique n'a pas encore déclenché à ce moment et que la quantité de ciment est diminuer.

La composition chimique de la pouzzolane présente une forte teneur en SiO_2 ce qui favorise l'activité pouzzolanique. La figure 4.18 montre le taux d'évolution de la résistance à la compression après 28 jours des BAP avec différents pourcentages en pouzzolanes. Cette activité pouzzolanique joue un rôle dans la consommation de la chaux libre présente dans la pâte du ciment qui favorise la résistance à long terme.

L'évolution de la résistance à la compression à 56 jours et au-delà augmente significativement en fonction de la contenance en pouzzolane par rapport à la résistance à 28 jours pour le même mélange (cf. Figure 4.18).

On définit le taux d'évolution (τ_{ev}) de la résistance par :

$$\tau_{ev} = \frac{R_{cj}}{R_{c28}} \cdot 100 \quad (\%) \quad (4.2)$$

Suite à ses observations sur l'évolution des résistances à la compression on peut avancer que l'apport de la pouzzolane semble être bénéfique à long terme pour les bétons autoplaçants et en particulier après 90 jours de durcissement. Le fait est observé plus évidemment sur les variations des taux d'évolutions des résistances.

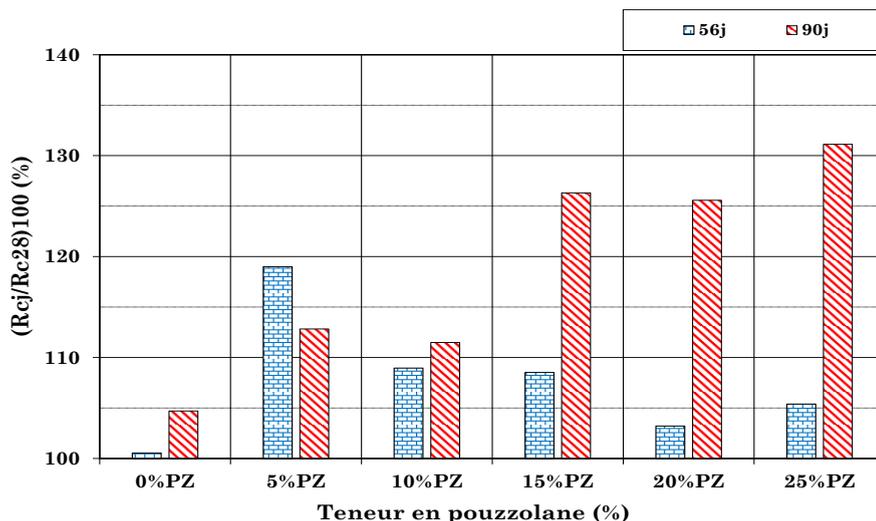


Figure 4.18 – Taux d'évolution de la résistance après 28 jours

4.5 Effet de la combinaison de la pouzzolane et de la poudre de marbre sur la résistance à la compression des BAP

Pour avoir l'effet de la pouzzolane naturelle et la poudre de marbre sur la résistance à la compression, on a opté deux systèmes de substitution (PZ/MP=1 et PZ/MP=1/3). Au regard de la figure 4.19 pour les BAP avec un rapport PZ/MP=1, on constate que la résistance à la compression diminue en fonction de la quantité d'ajouts dans les mélanges. Un effet similaire est remarqué aussi pour le deuxième système de substitution PZ/MP=1/3 (cf. Figure 4.20).

Les tableaux 4.5 et 4.6 récapitulent les taux des diminution des résistances à la compression par rapport à ceux correspondant à 28 jours de durcissement pour les deux systèmes. À

jeune âge (7jours) la diminution de la résistance est la plus élevée et le pourcentage de 20% d'ajouts semble être le moins affecté par la présence d'ajouts. À 28 jours le taux de diminution de la résistance à la compression est de l'ordre 15 à 56% pour les BAP avec 10 à 50% d'ajouts pour les deux systèmes. A long terme la combinaison de deux ajouts a réduit l'écart entre la résistance et celle de référence de l'ordre de 7 et 42% à 90 jours pour le premier système, et de 9 et 50% à 90 jours pour le deuxième système.

Ghrici et al [14] ont observé un effet similaire de la pouzzolane sur le développement de la résistance à la compression sur cinq mélanges des mortiers ordinaires à différentes teneurs en pouzzolane 0%, 10%, 20%, 30% et 40%. Ils ont observé une diminution systématique de la résistance à la compression avec l'augmentation de la teneur en pouzzolane durant les stades avancés d'hydratation. Au-delà de 28 jours et jusqu'au moins 90 jours, la présence de la pouzzolane a été bénéfique à 10% et 20% de substitution. Une remarquable diminution de résistance, pour tous les ages, a été observée pour les mélanges de mortiers contenant plus de 30% de pouzzolane. Ghrici et al [13] ont montré aussi que 10% des fillers calcaire avec une faible quantité en pouzzolane naturelle contribue positivement sur la résistance à la compression à jeune âges. Par contre, après 28 jours l'effet bénéfique est observé pour une forte teneur en pouzzolane naturelle et une faible teneur en fillers calcaires.

Un effet similaire sur la résistance à la compression a été observé avec la pouzzolane naturelle sur béton ordinaire [127] et les bétons autoplaçant [128].

En dehors du souci économique, des études récentes suggèrent que certaines combinaisons d'ajouts améliorent mieux la résistance à la compression, l'ouvrabilité et le module d'élasticité du béton lorsque les ajouts sont utilisés séparément. Selon Samet et Chaabani [129], un béton à base de fumée de silice se trouve avec une résistance à la compression 15% supérieure lorsqu'on lui substitue 15% du laitier tunisien. Toutanji et al [130] ont obtenu, avec un mélange de 10% de fumée de silice, 25% de laitier et 15% de cendre volante, une meilleure résistance lorsque les éprouvettes sont exposées à des cycles gel-dégel.

Toujours dans le cadre d'effet des ajouts combinés, Fang et al [114], ont pu améliorer la résistance à la compression à 28 jours à 69 MPa en substituant au ciment 30% de cendres volantes et 30% de laitier mais en prenant un rapport E/L égale à 0,28.

Tableau 4.3 – Résistances à la compression des BAP ternaires (PZ/MP=1)

Résistance à la compression (MPa)							
PZ/MP = 1	PZ+MP						
Ages (jours)	0%	10%	15%	20%	30%	40%	50%
07	28.42	22.55	23.10	24.07	21.15	14.47	12.05
28	37.20	31.82	31.40	24.20	26.15	21.97	16.55
56	37.40	32.28	32.18	32.08	26.67	22.65	18.73
90	38.95	36.25	35.51	34.96	33.22	27.61	22.61

Tableau 4.4 – Résistances à la compression des BAP ternaires (PZ/MP=1/3)

Résistance à la compression (MPa)							
PZ/MP = 1/3	PZ+MP						
Ages (jours)	0%	10%	15%	20%	30%	40%	50%
07	28.42	21.20	21.15	23.30	17.30	16.70	11.70
28	37.20	31.65	28.75	28.00	26.02	25.21	16.23
56	37.40	32.08	30.15	27.10	28.73	26.18	17.55
90	38.95	35.28	31.56	33.08	29.98	26.81	19.56

Les Figures 4.19 et 4.20 montre la variation de la résistance à la compression en fonction de la teneur en Pouzzolane et en poudre de marbre pour les différents âges.

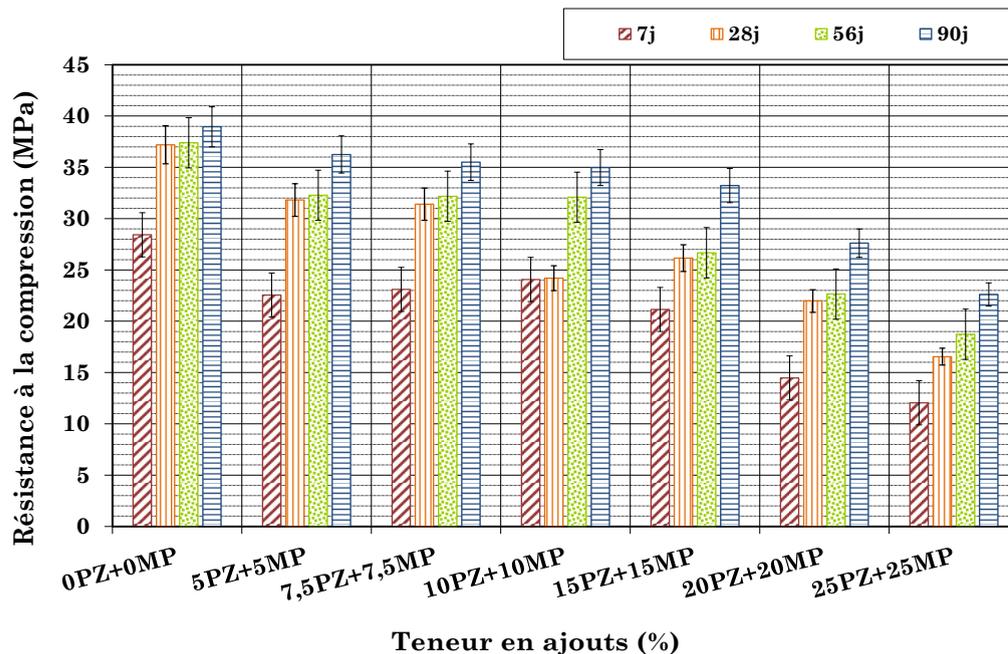


Figure 4.19 – Résistance au compression pour les BAP ternaire (PZ/MP=1)

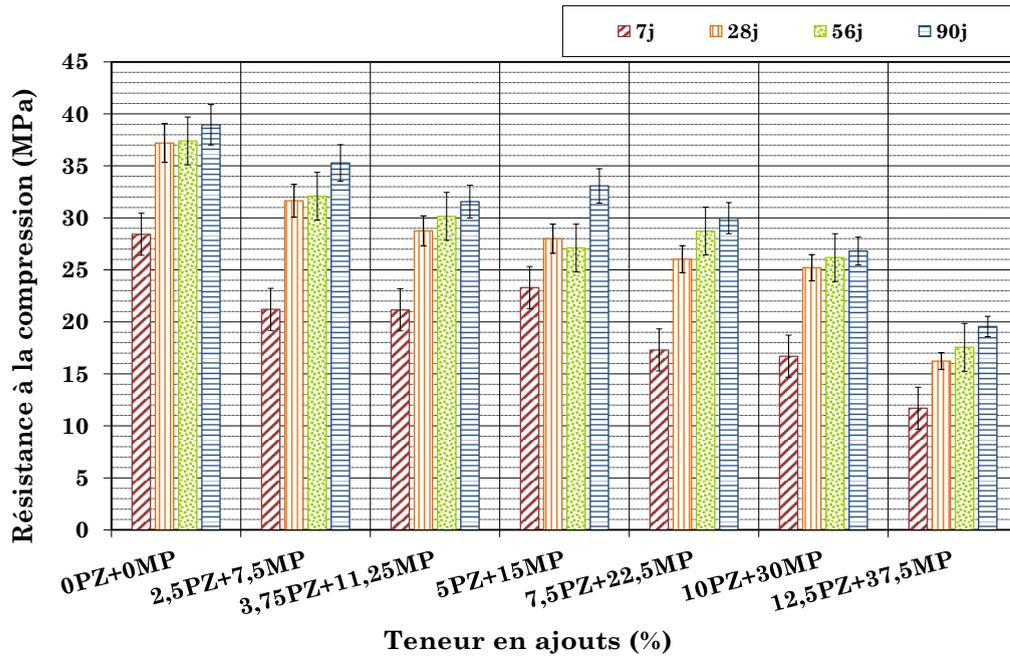


Figure 4.20 – Résistance au compression pour les BAP ternaire (PZ/MP=1/3)

Tableau 4.5 – Taux diminution de la résistance à la compression à «j» jours par rapport à celle de référence à «j» jours pour un rapport PZ/MP=1

Taux de diminution $[(R_{c_j}/R_{c_{j_{ref}}}) \cdot 100] - 100\%$						
PZ/MP = 1	PZ+MP					
Ages (jours)	10%	15%	20%	30%	40%	50%
07	20%	19%	15%	26%	49%	58%
28	15%	16%	35%	30%	41%	56%
56	14%	14%	14%	29%	39%	50%
90	7%	9%	10%	15%	29%	42%

Tableau 4.6 – Taux diminution de la résistance à la compression à «j» jours par rapport à celle de référence à «j» jours pour un rapport PZ/MP=1/3

Taux de diminution $[(R_{c_j}/R_{c_{j_{ref}}}) \cdot 100] - 100\%$						
PZ/MP = 1/3	PZ+MP					
Ages (jours)	10%	15%	20%	30%	40%	50%
07	25%	26%	18%	39%	41%	59%
28	15%	23%	25%	30%	32%	56%
56	14%	19%	28%	23%	30%	53%
90	9%	19%	15%	23%	33%	50%

SYNTHÈSE DES RÉSULTATS PHYSICO-MÉCANIQUES

L'utilisation des ajouts minéraux dans l'industrie cimentaire semble être indispensable sinon la production ne peut jamais satisfaire la demande du marché.

L'incorporation de plus en plus d'ajouts avec la combinaison des mélanges binaires et ternaires et même quaternaires s'avère une nouvelle tâche pour les scientifiques afin de trouver la formulation convenable sans chute de résistance ni crainte de durabilité.

En suivant le dégagement de la chaleur d'hydratation des mortiers autoplaçant binaire et ternaire à l'aide de calorimètre semi-adiabatique, on constate que la pouzzolane naturelle (PZ) à minimiser la température à l'intérieur des mélanges. Le dégagement de la chaleur d'hydratation pour le mortier avec 10% est de l'ordre de 200 J/g. La substitution du ciment avec la pouzzolane naturelle dégage plus de la chaleur d'hydratation à court terme (18 heures après malaxage) par rapport au mortier de référence.

L'utilisation de la pouzzolane naturelle a augmenté le flux de chaleur et a avancé l'apparition du pic d'hydratation principal, à l'exception de mortier avec 10%. Cet avancement du pic diminue la période dormante d'hydratation.

L'introduction de la poudre de marbre avec la pouzzolane naturelle (ciment ternaire) a diminué considérablement la température à l'intérieur du mélange.

Le ciment ternaire à base de la pouzzolane et de la poudre de marbre provoque la diminution de la quantité de flux de chaleur dans les mortiers ternaires par rapport au mortier binaire à base de la pouzzolane naturelle seule.

Sur le plan de comportement mécanique des bétons autoplaçants, la résistance à la compression varie en diminution en fonction de la teneur en pouzzolane naturelle de 37 MPa à 25 MPa à 28 jours. Mais cette réduction de résistance reste dans la limite acceptable pour un béton qui peut être utilisé dans nos chantiers.

La réaction pouzzolanique de la pouzzolane se caractérise à long terme par la consommation de la chaux hydratée dans les bétons et la formation de la seconde ettringite qui densifie la pâte du ciment. Par conséquent, la résistance mécanique à long terme (90 jours) rattrape son retard et devient comparable à celle de référence.

L'utilisation de la poudre de marbre avec de la pouzzolane naturelle a diminué la résistance à la compression en fonction du taux de substitution.

CHAPITRE 5

DURABILITÉ DES MORTIERS AUTOPLAÇANTS

5.1 Introduction

La durabilité d'un ouvrage se caractérise par sa capacité à conserver dans les conditions prévues les fonctions d'usage pour lesquelles il a été conçu (fonctionnement structurel, sécurité, confort des usagers) et à maintenir son niveau de fiabilité et son aspect, dans son environnement, avec des frais de maintenance et d'entretien aussi réduits que possible. Une mauvaise durabilité se manifeste par une détérioration qui peut résulter de facteurs externes ou de phénomènes internes du béton.

Depuis quelques années certains laboratoires de recherche comme le Laboratoire Central des Ponts et Chaussées de Paris (LCPC de Paris) se sont intéressés de près au phénomène de la formation différée de l'ettringite dans les bétons causée principalement par des attaques sulfatiques internes au béton et des thèses de doctorat ont été soutenues dans ce domaine [87] et [88]. Deux formes d'endommagement des bétons par des attaques sulfatiques externes sont répandues et peuvent endommager les bétons :

- La présence de sols gypseux en zones urbaines et qui pouvant contenir jusqu'à 85% de gypse à partir de 12 m de profondeur [131–134] est à l'origine de multiples formes d'endommagement des bétons. En temps de fortes pluies, certaines parties des constructions se retrouvent immergées dans des solutions souterraines contenant des doses importantes de sulfates [135] et causent souvent leur dégradation et leur corrosion.

L'effet de la pouzzolane seule et la combinaison de la pouzzolane naturelle avec la poudre de marbre sur la durabilité des mortiers autoplaçants vis-à-vis l'attaque sulfatique par MgSO_4 et Na_2SO_4 , l'attaque par les acides HCl et H_2SO_4 sera analysé dans ce chapitre. En se basant sur les résultats des essais de compression des BAP les mélanges retenus pour cette phase d'étude sur la durabilité sont :

- Les mortiers à base des ciments binaires avec des pourcentages de pouzzolane naturelle de 5, 10 et 15% ;
- Les mortiers à base des ciments ternaires avec des pourcentages combinés de pouzzolane naturelle et de poudre de marbre de 5%PZ+5%MP, 5%PZ+10%MP, 5%PZ+15%MP et 10%PZ+10%MP ;

Le suivi de la durabilité est effectué uniquement sur les mortiers autoplaçants vu que l'évolution de la durabilité est en principe identique à celle des bétons autoplaçants et vu que les essais normalisés sont destinés essentiellement aux mortiers. La durabilité est suivie vis-à-vis l'attaque des sulfates et des acides.

5.2 Durabilité vis-à-vis de l'attaque des sulfates

Dans ce cas on s'intéresse à suivre la durabilité vis-à-vis de deux types de sulfates : les sulfates de magnésium et les sulfates de sodium. Dans les deux cas les mortiers sont soumis à l'immersion totale dans les solutions sulfatiques.

5.2.1 Attaque par les sulfates de magnésium (MgSO_4)

5.2.1.1 Mortiers binaire à base de pouzzolane

Les résultats de l'expansion pour les mortiers à base des ciments binaires immergés dans la solution d'eau distillée contenant 5% de MgSO_4 sont représentées dans la figure 5.1.

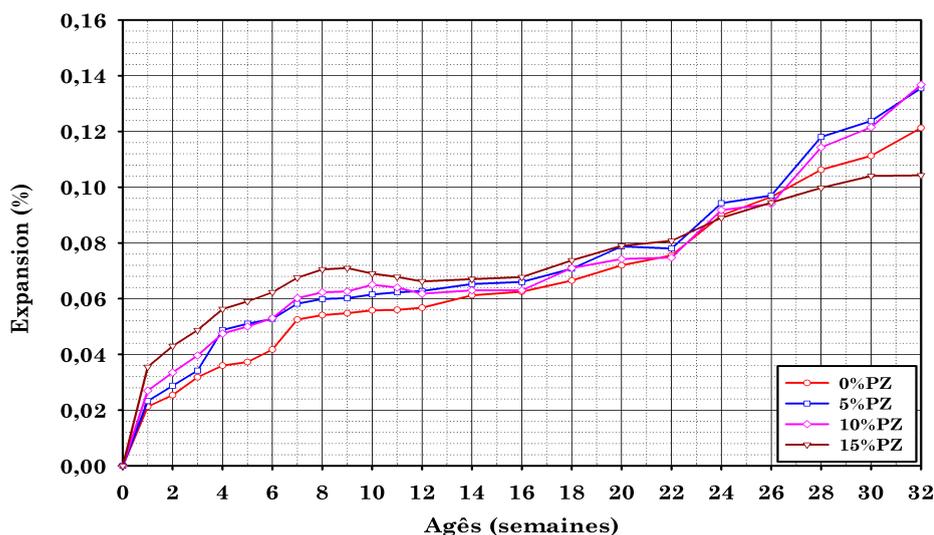


FIGURE 5.1 – Expansion des mortiers binaires immergés dans 5% de MgSO_4

L'introduction de la pouzzolane naturelle n'a pas vraisemblablement apporté une amélioration vis-à-vis de l'attaque sulfatique pendant 6 mois, la figure 5.1 montre que tous les mortiers à base de pouzzolane présentent des allongements supérieurs à ceux du mortier de référence. Entre 6 mois et 8 mois le mortier avec 15% de pouzzolane présentent des allongements légèrement plus faibles à celui de référence. Cet effet négatif d'expansion des mortiers à base de la pouzzolane est probalement dû à l'utilisation de ciment de type

CEM I/42.5 CRS (ciment résistant aux sulfates).

L'addition de 15% de pouzzolane naturelle produit une réduction de l'expansion de l'ordre de 13% par rapport à celle du mortier de référence. Le taux d'expansion élevé observé dans les mortiers avec 5 et 10% probablement dû à la formation de la seconde ettringite, qui conduit à l'expansion et à la fissuration des mortiers.

Les figures 5.2, 5.3 et 5.4 présentent les observations par MEB des échantillons avec des taux en pouzzolane de 0, 10 et 15%. La figure 5.2 montre l'apparaition des fissures dans tous les sens ce qui produit l'expansion de mortier due aux attaques de $MgSO_4$ au niveau de parement d'échantillon contenant 0%PZ, ces fissures sont moins importantes que celles trouvées dans le mortier avec 10% PZ (cf. Figure 5.3). Par contre, l'utilisation de 15% de pouzzolane semble apporter une amélioration de point de vue microscopique aucun signe d'expansion, la figure 5.4 montre l'absence presque totale des fissures. La présence des aiguilles d'ettringite secondaires mais avec des quantités assez faible pour produire l'expansion excessive du mortier.

Dans les mortiers contenant la pouzzolane naturelle, la réaction pouzzolanique consomme une partie de $Ca(OH)_2$ produite au cours de l'hydratations du ciment, d'où la quantité de gypse formée au cours de réaction entre les sulfates et $Ca(OH)_2$. Cette quantité de chaux est responsable de la formation d'ettringite secondaire, sera plus petite dans les ciments pouzzolanique par rapport aux ciments ordinaires.

Selon Ghrici et al [13] la réaction pouzzolanique produit le CSH secondaire qui conduit à la densification de la pâte de ciment durcie en étant déposée dans les pores et améliore l'interface pâte-agrégat. Ghrici et al [13] ont trouvé aussi que l'utilisation de 30% de pouzzolane naturelle à diminué l'expansion de l'ordre de 54% par rapport au mortier à base de ciment ordinaire.

Khelifa [86] a trouvé que les bétons les moins résistants aux différentes expositions sulfatées sont ceux à base de ciment CEM II/A 42,5. Selon cet auteur les bétons à base de ciment CEM I 42,5 PM-ES résistent aux sulfates et se comportent sans signe d'altération face aux différentes ambiances étudiées.

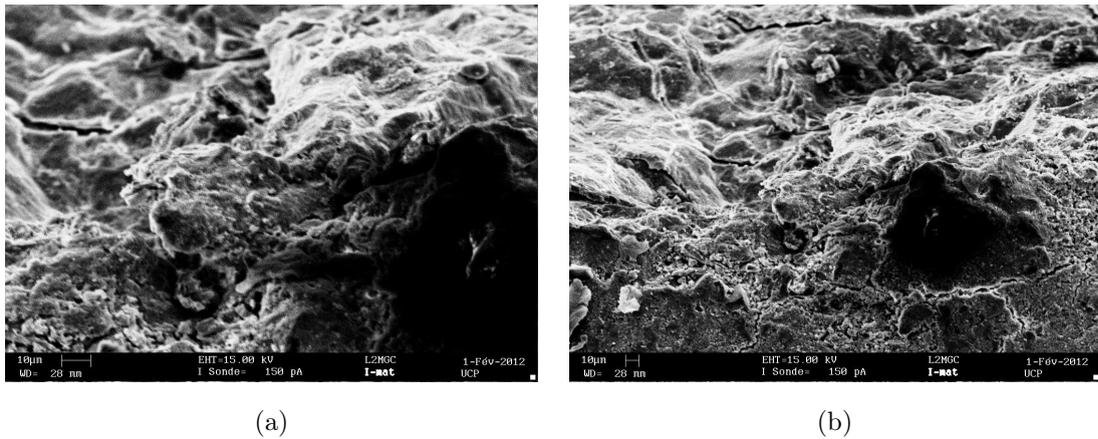


FIGURE 5.2 – Observations au MEB d'échantillons de mortier autoplaçant avec 0%PZ exposé à l'immersion dans une solution de 5% de $MgSO_4$ pendant 8 mois ; (a) Fracture (x2500/15kv)-(b) Fracture (x1600/15kv)

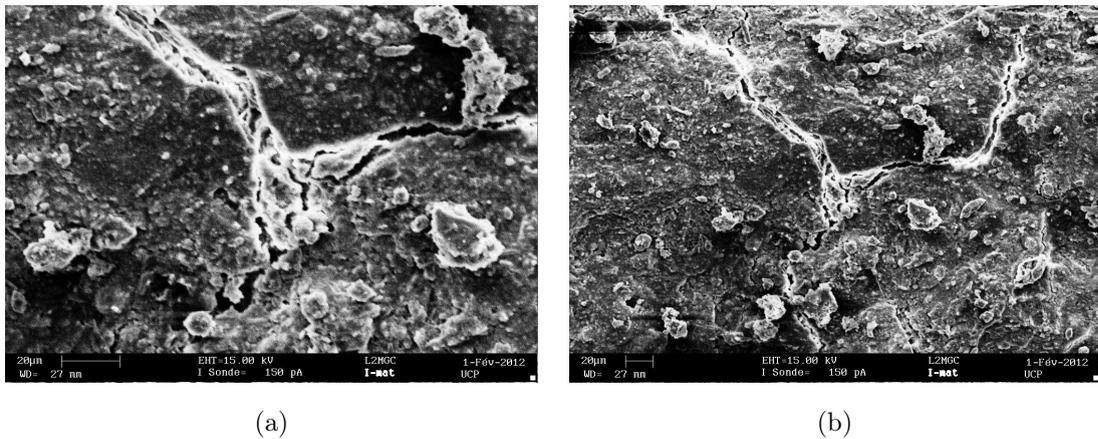


FIGURE 5.3 – Observations au MEB d'échantillons de mortier autoplaçant avec 10%PZ exposé à l'immersion dans une solution de 5% de $MgSO_4$ pendant 8 mois ; (a) Fracture (x2500/15kv)-(b) Fracture (x1600/15kv)

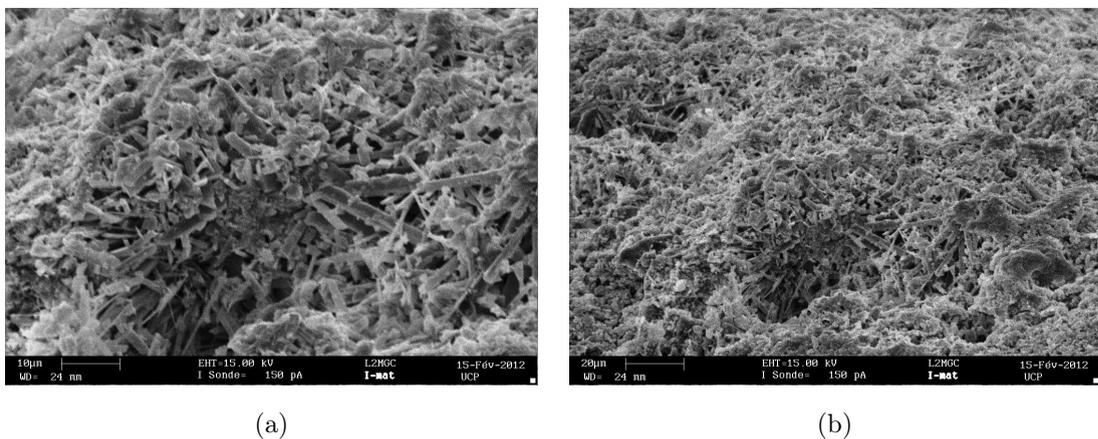


FIGURE 5.4 – Observations au MEB d'échantillons de mortier autoplaçant avec 15%PZ exposé à l'immersion dans une solution de 5% de $MgSO_4$ pendant 8 mois ; (a) Fracture (x5000/15kv)-(b) Fracture (x2500/15kv)

La variation de la perte en masse pour les différents essais est définie par le coefficient τ_m donné par :

$$\tau_m (\%) = \frac{M_2 - M_1}{M_1} \cdot 100 \quad (5.1)$$

avec :

M_1 : Masse d'éprouvette avant l'immersion.

M_2 : Masse d'éprouvette nettoyée après l'immersion.

Si $\tau_m > 0$: Gain de masse.

Si $\tau_m < 0$: Perte de masse.

La variation de perte en masse des mortiers binaires à base de pouzzolane est représentée dans la figure 5.5. On remarque qu'on a un gain en masse pour tous les mortiers exposés à environ 6 mois d'attaque en solution de 5% MgSO_4 . Pour les durées d'immersion supérieures à 6 mois une légère perte en masse est remarquée pour les mortiers à base de pouzzolane naturelle. Le mortier de référence (0%PZ) nous donnent les valeurs de perte en masse les plus faibles. La valeur la plus élevée de de taux de vatiation des masses est constaté pour les mortier avec de la pouzzolane naturelle.

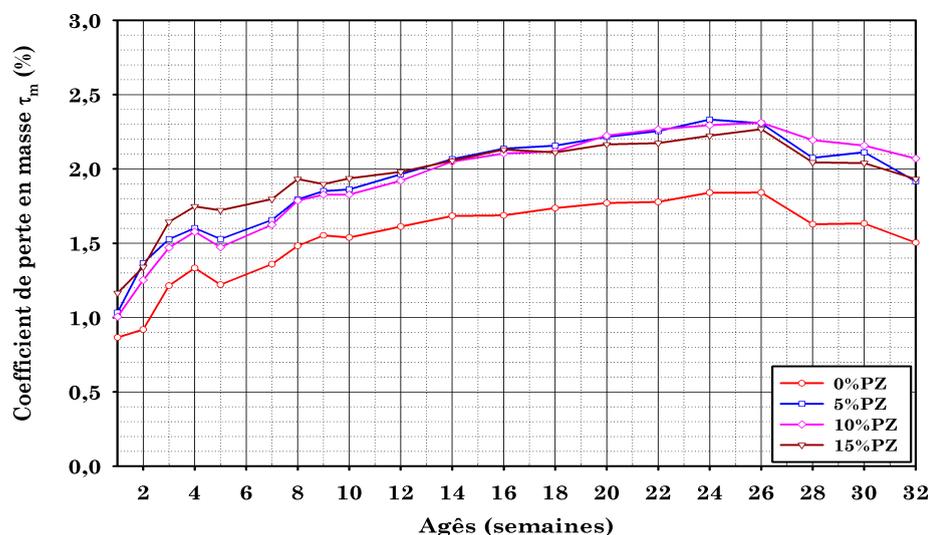


FIGURE 5.5 – Perte en masse des mortiers binaires dans 5% de MgSO_4

Les figures 5.6.(a) et 5.6.(b) représentent l'état de sulfates (examen visuel) des éprouvettes des mortiers binaire et ternaire. On remarque un petit signe d'endommagement par les sulfates de magnésium sur les bords des éprouvettes après 8 mois d'immersion.



FIGURE 5.6 – Examen visuel des éprouvettes pour : (a) Mortier binaire; (b) Mortier ternaire exposé à 5% de $MgSO_4$ après 8 mois

5.2.1.2 Mortiers ternaire à base de la pouzzolane et de la poudre de marbre

La figure 5.7, présente l’expansion des différents mortiers à base des ciments ternaires. On constate que l’introduction de la poudre de marbre avec des teneurs dépassant 5% provoque la diminution de l’expansion d’une manière significative pour les premiers 6 mois. Le mortier avec 10%PZ+10%MP présente la plus faible expansion pour les mortiers exposés à 5% $MgSO_4$ sa valeur est de l’ordre de 48%. Le mortier avec 5%PZ+5%MP montre un signe de faiblesse vis-à-vis de l’attaque sulfatique surtout pour les premiers 6 mois, au-delà de 6 mois ce mortier présente des valeurs d’expansion légèrement faible par rapport a celle de référence.

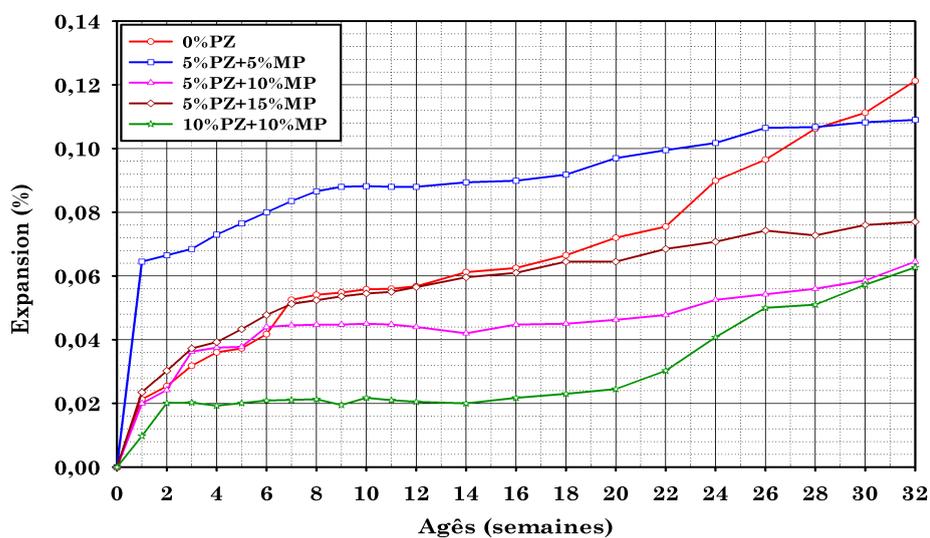


FIGURE 5.7 – Expansion des mortiers ternaires immergés dans 5% de $MgSO_4$

Ghrici et al [13] ont montré que l’addition de 15% des fillers calcaires produit une

réduction d'expansion de l'ordre de 36% par rapport à l'expansion de mortier de référence. Dans notre cas la poudre de marbre contribue à la diminution de l'expansion après 8 mois de l'ordre de 11%, 47% et 37% respectivement pour les mortiers avec une quantité de poudre de marbre 5%, 10% et 15%.

Gonzalez et Irassar [136] rapporte que l'addition de 10% des fillers calcaires réduit l'expansion de 30% après 6 mois d'exposition dans une solution de 5% Na_2SO_4 . Cette réduction d'expansion pour les mortiers à base des fillers calcaires probablement causée par la formation de monocarboaluminate en présence de calcaire et donc la suppression ou le retard de la conversion de l'ettringite à monosulfialuminate.

Cependant, Ghrici et al [13] ont trouvé que l'addition de la pouzzolane naturelle avec les fillers calcaires n'améliore pas la résistance vis-à-vis l'attaque sulfatiques pour les mortiers ordinaires.

En observant les figures 5.8 et 5.9 qui représentent les observations à l'aide de MEB, on remarque que les signes d'attaque sulfatique pour les mortiers avec 5%PZ+5%MP et plus clair par rapport à celle de mortier avec 10%PZ+10%MP, cela confirme l'allure de la courbe d'expansion dans la figure 5.7. L'augmentation de la différence d'expansion entre les mortiers contenant 5%PZ+5%MP et ceux contenant 10%PZ+10%MP se traduit d'une part par la taille des fissures observées et d'autre part par la formation des aiguilles d'ettringite secondaire.

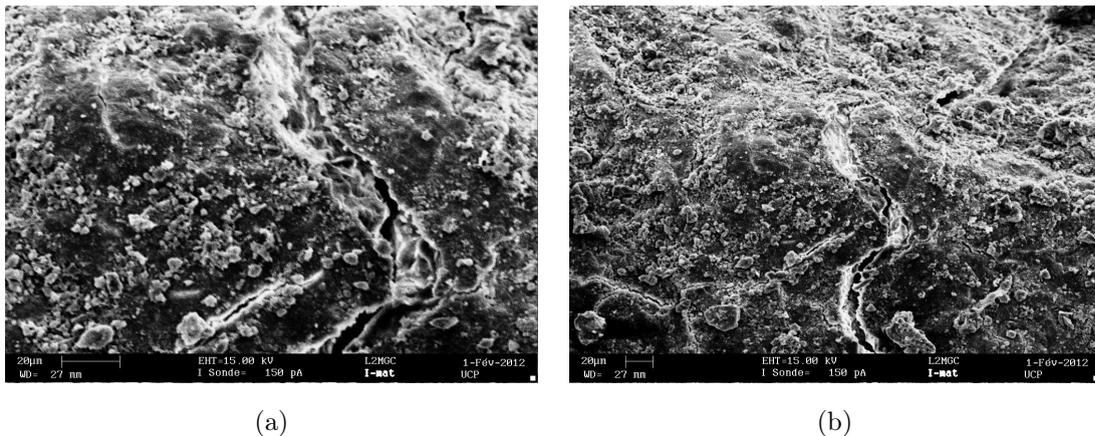


FIGURE 5.8 – Observations au MEB d'échantillons de mortier autoplaçant avec 5%PZ+5%MP exposé à l'immersion dans une solution de 5% de MgSO_4 pendant 8 mois ; (a) Fracture (x2500/15kv)-(b) Fracture (x1600/15kv)

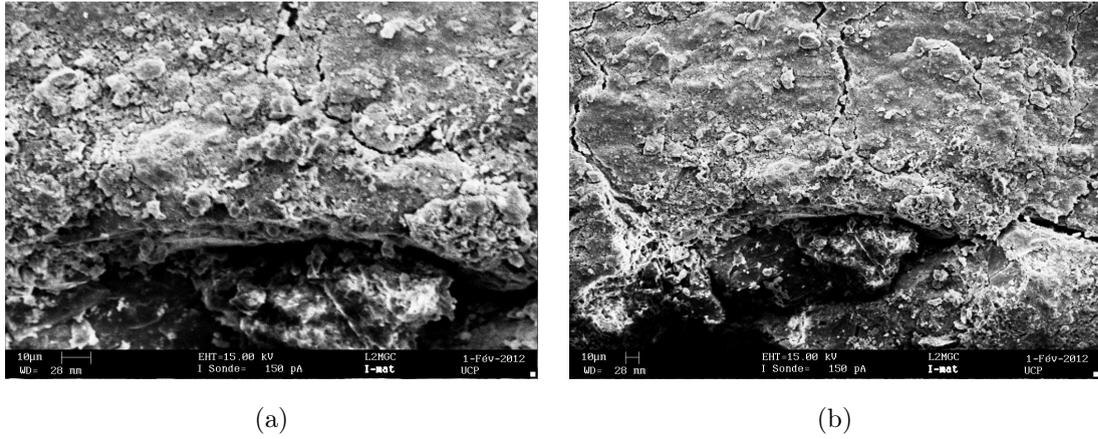


FIGURE 5.9 – Observations au MEB d'échantillons de mortier autoplaçant avec 10%PZ+10%MP exposé à l'immersion dans une solution de 5% de $MgSO_4$ pendant 8 mois ; (a) Fracture (x2500/15kv)-(b) Fracture (x1600/15kv)

La perte en masse en fonction du temps pour les mortiers confectionnés à base des ciments ternaire pendant 8 mois est représentée sur la figure 5.10.

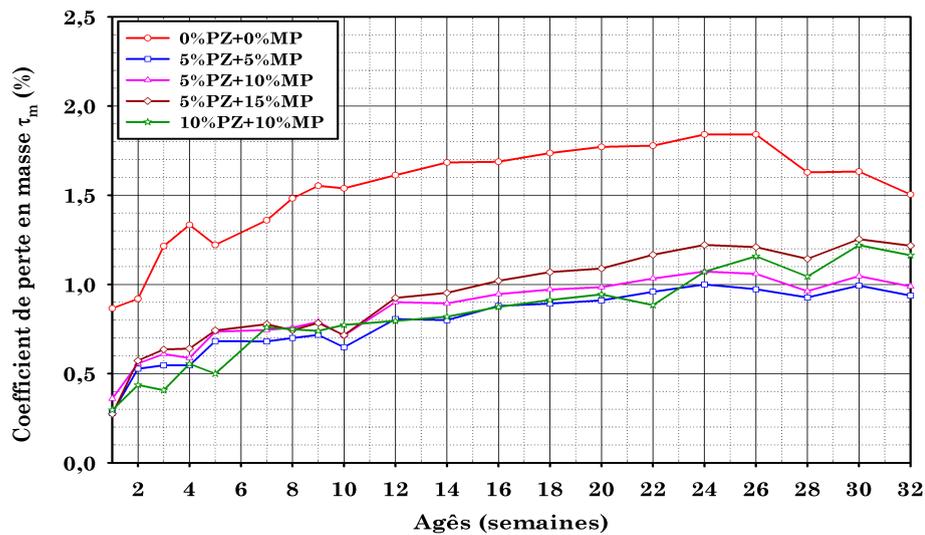


FIGURE 5.10 – Perte en masse des mortiers ternaires dans 5% de $MgSO_4$

La combinaison de la pouzzolane et de la poudre de marbre a apporter une nette amélioration sur la perte en masse pour tous les mortiers ternaires. On constate un gain en masse pour tous les mélanges pendant 6 mois. Au-delà de 6 mois une légère perte est remarquée pour les mortiers ternaires. Ce gain de masse peut expliquer la résistance des mortiers ternaires vis-à-vis de l'attaque par les sulfates.

5.2.2 Attaque par les sulfates de sodium (Na_2SO_4)

5.2.2.1 Mortiers binaire à base de pouzzolane

Les variations de l'expansion des mortiers à base des ciments binaires immergés dans une solution de 5% Na_2SO_4 sont illustrées dans la figure 5.11.

On remarque dans ce cas un effet global similaire à celui de l'attaque par les sulfates de magnésium MgSO_4 . Pour ce type d'attaque des mortiers autoplacants le mortier contenant 5% de pouzzolane naturelle présente des valeurs d'expansion plus élevées par rapport aux autres mortiers. Après 8 mois d'immersion ce mortier a donné une valeur d'expansion supérieure de 49% par rapport au mortier de référence. Par contre, le mortier avec 15% de pouzzolane a donné une valeur d'expansion inférieure de 19% par rapport au mortier de référence. On remarque aussi que le mortier de référence présente un bon comportement vis-à-vis de cette attaque. L'utilisation du ciment de type CEM I/42.5 (CRS) avec faible teneur en C_3A semble jouer un rôle important dans la résistance par l'attaque sulfatique. Kaid et al [137] ont montré que l'incorporation de la pouzzolane naturelle dans la composition des bétons fabriqués par des ciment composés de type CEM II/A 42.5 (avec 8 à 10% des fines calcaire), contribue à l'élaboration des bétons avec des résistances à la compression suite à l'attaque par des sulfates de sodium comparables à celle du béton de référence exposé à la même attaque.

Chihaoui et al [138] ont trouvé que les mortiers à base de pouzzolane naturelle avec des valeurs variant entre 10 et 30% présentent une expansion qui accroît régulièrement en fonction de la durée d'immersion dans les sulfates de sodium. Ce qui se traduit par l'apparition des phases minéralogiques expansives dans le matériau durci susceptibles de faire gonfler et fissurer la pâte du ciment.

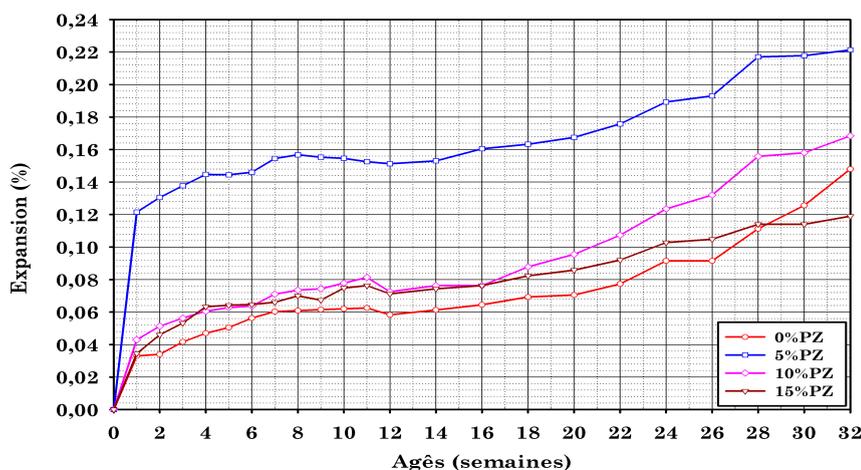


FIGURE 5.11 – Expansion des mortiers binaires immergés dans 5% de Na_2SO_4

La figure 5.12 représente l'analyse microscopique par MEB d'échantillon de mortier autoplaçant avec 15% de pouzzolane après 8 mois d'immersion dans les sulfates de sodium. On constate la présence des quantités des pores pour la formation d'ettringite secondaire, ce qui peut expliquer pourquoi ce mortier présente la plus faible valeur d'expansion par rapport aux autres.

Les variations des masses pour les mortiers binaires à base de pouzzolane sont regroupées dans la figure 5.13. L'analyse des résultats montre que tous les mortiers autoplaçants conservés dans la solution de 5% de sulfate de sodium ont eu un gain en masse. Ce gain est attribué à la formation du gypse et de l'ettringite secondaire suite à la réaction entre les hydrates et particulièrement la portlandite et les sulfates de la solution.

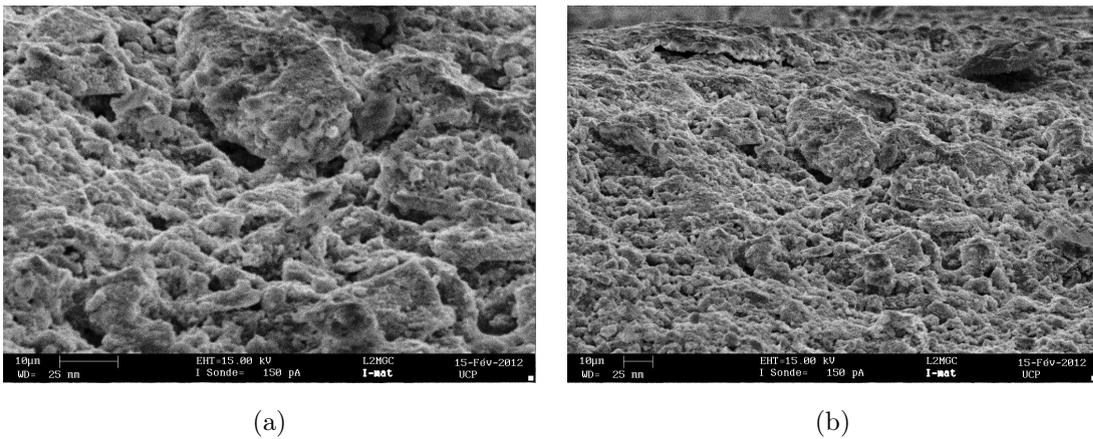


FIGURE 5.12 – Observations au MEB d'échantillons de mortier autoplaçant avec 15%PZ exposé à l'immersion dans une solution de 5% de Na_2SO_4 pendant 8 mois ; (a) Fracture (x5000/15kv)-(b) Fracture (x2500/15kv)

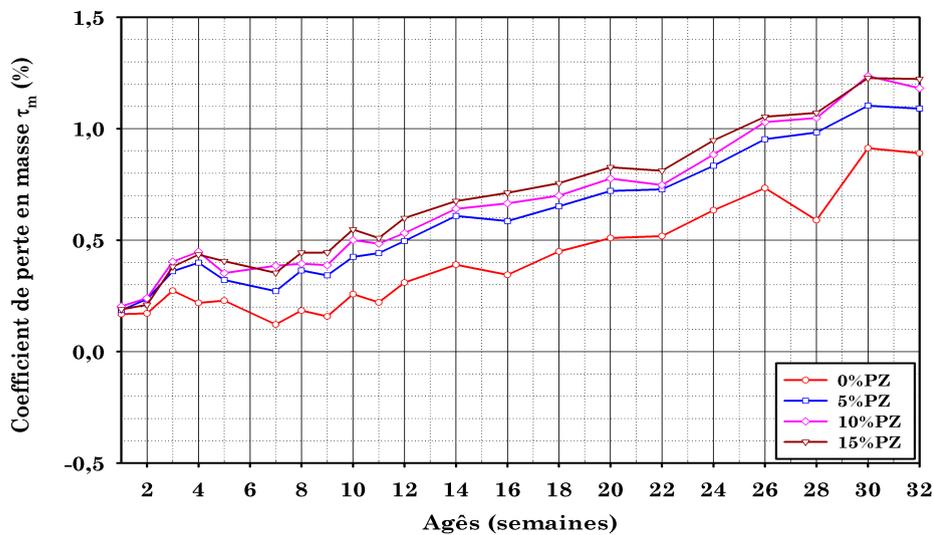


FIGURE 5.13 – Perte en masse des mortiers binaires au cours du temps dans 5% de Na_2SO_4

Chihaoui et al [138] ont montré que les mortiers pouzzolaniques présentent des gains en masse moins importants que ceux du mortier témoin. Cela est dû à la réaction pouzzolaniques de la pouzzolane naturelle qui consomme la portlandite responsable de la formation du gypse et de l'ettringite, d'où le gain en masse de mortier pouzzolanique est réduit par rapport au mortier sans pouzzolane. Par contre, dans notre cas le gain de masse est beaucoup plus pour les mortiers à base de pouzzolane est supérieur à ce du mortier de référence, ce qui explique que la formation du gypse et de l'ettringite secondaire est plus important pour les mortiers avec pouzzolane à celle de référence, et cela est probablement lié au type du ciment utilisé (Ciment résistant aux sulfates).



FIGURE 5.14 – Examen visuel des échantillons exposé à 5% de Na_2SO_4 après 8 mois : (a) Mortier binaire - (b) Mortier ternaire

Concernant les mortiers binaires et ternaires immergés dans une solution dosé à 5% de sulfates de sodium, aucun signe macroscopique dégradation n'a été observé sauf pour les mortiers ternaires avec 10%PZ+10%MP, dont l'endommagement s'est manifesté par l'apparition de fissurations sur la surface supérieure d'échantillon exposé pendant 8 mois à l'attaque sulfatique (cf. Figures 5.14 et 5.15).



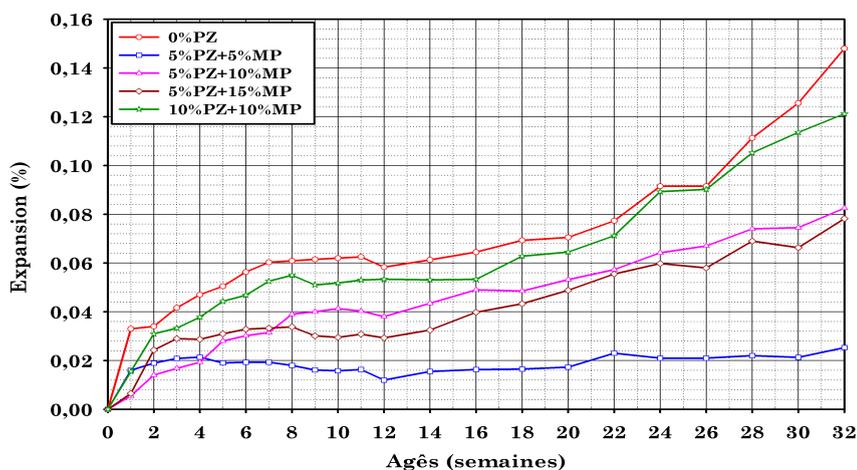
FIGURE 5.15 – Examen visuel de mortier ternaire contenant 10%PZ+10%MP exposé à 5% de Na_2SO_4

5.2.2.2 Mortiers ternaire à base de la pouzzolane et de la poudre de marbre

Pour évaluer le comportement des mortiers autoplaçants vis-à-vis de l'attaque par les sulfates de sodium, on a opté pour l'immersion des éprouvettes de MAP pendant 8 mois dans une solution de 5% Na_2SO_4 . Dans la figure 5.16 on voit que la poudre de marbre apporte un net gain de résistance aux attaques par les sulfates de sodium. Le mortier avec 5%PZ+5%MP n'a subi pratiquement aucune expansion significative. On remarque aussi que le mortier de référence présente la plus faible résistance aux attaques des sulfates de sodium caractérisée par des taux d'expansion les plus élevés. Un effet similaire est constaté pour les mortiers immergés dans les sulfates de magnésium, à l'exception de mortier avec 5%PZ+5%MP. Boukhelkhal [139] a montré que la substitution de ciment avec la poudre de marbre apporte une amélioration vis-à-vis de l'attaque par les sulfates de magnésium, et que l'expansion diminue de l'ordre de 32 à 43% pour des teneurs en poudre de marbre respectives de 5 et 20%.

L'observation microscopique représentée dans les figure 5.17 et 5.18, montre que la structure microscopique semble être stable sans présence de signe d'expansion. La présence de l'ettringite secondaire pour les mortier avec 5%PZ+5%MP et 10%PZ+10%MP n'est pas signalée.

La figure 5.19, présente la variation de perte en masse des mortiers ternaires exposé à une solution de 5% de Na_2SO_4 . On constate que l'introduction de la poudre de marbre à diminué le gain de masse apporté pour les mortiers binaire dans la même solution, à l'exception de mortier avec 10%PZ+10%MP. l'incorporation de la pouzzolane naturelle et la poudre de marbre dans le ciment entraîne à des gains de masse comparables a ceux du mortier de référence.

FIGURE 5.16 – Expansion des mortiers ternaires immergés dans 5% de Na_2SO_4

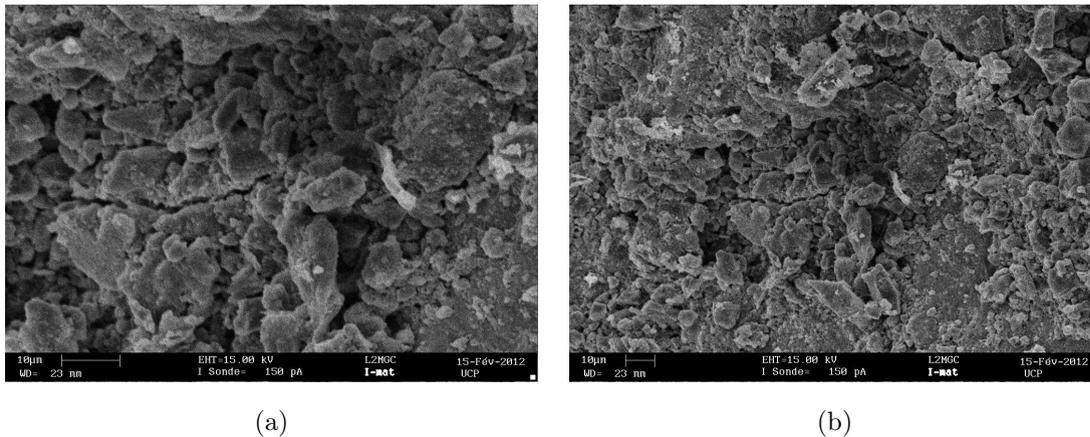


FIGURE 5.17 – Observations au MEB d'échantillons de mortier autoplaçant avec 5%PZ+5%MP exposé à l'immersion dans une solution de 5% de Na_2SO_4 pendant 8 mois ; (a) Fracture (x5000/15kv)-(b) Fracture (x2500/15kv)

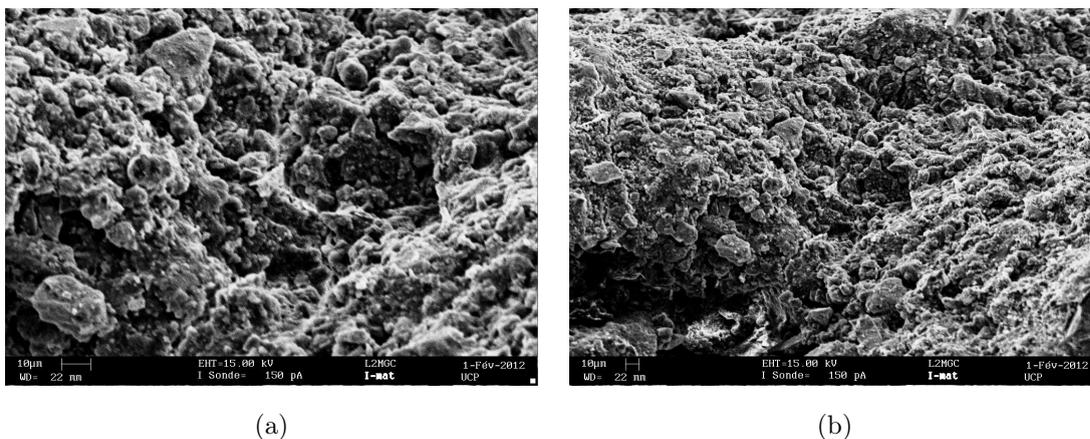


FIGURE 5.18 – Observations au MEB d'échantillons de mortier autoplaçant avec 10%PZ+10%MP exposé à l'immersion dans une solution de 5% de Na_2SO_4 pendant 8 mois ; (a) Fracture (x2500/15kv)-(b) Fracture (x1600/15kv)

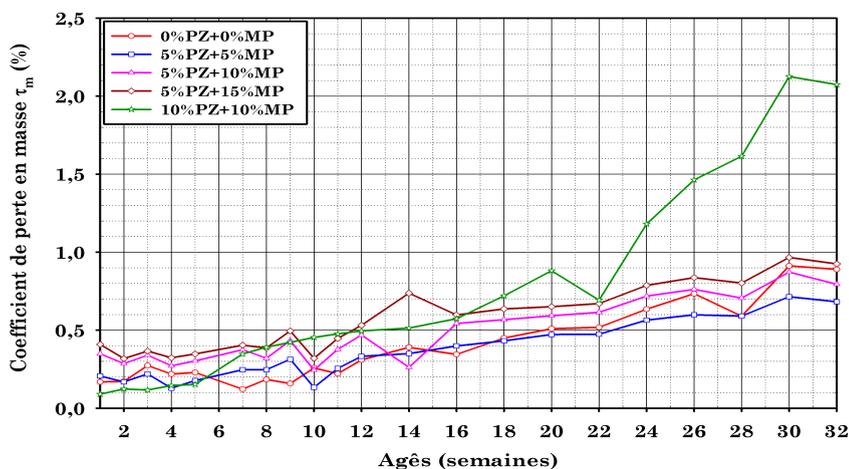


FIGURE 5.19 – Perte en masse des mortiers ternaires immergés dans 5% de Na_2SO_4

5.3 Durabilité vis-à-vis à l'attaques des acides

La durabilité des mortiers autoplaçants vis-à-vis de l'attaque des acides est analysée suivant deux types des acides : les acides sulfurique et les acides chlorhydrique. Dans les deux cas les mortiers sont soumis à l'immersion totale.

5.3.1 Attaque par l'acide sulfurique (H_2SO_4)

5.3.1.1 Mortiers binaire à base de pouzzolane

Les pertes de masse des éprouvettes des mortiers binaires placées dans une solution contenant 2.5% H_2SO_4 est montré dans la figure 5.20.

La figure 5.20 montre la perte de masse des éprouvettes des mortiers binaires à base de pouzzolane naturelle exposés à l'attaque de l'acide sulfurique (H_2SO_4) pendant 6 mois d'immersion totale. On remarque que l'introduction de la pouzzolane a provoquer la diminution de la perte de masse ce qui doit entraîner à l'amélioration de la résistance vis-à-vis l'attaque de l'acide sulfurique et que le mortier de référence (0%PZ) présente la plus grande valeur de perte de masse de l'ordre de 35%. L'introduction de 15% de pouzzolane a diminuer la perte de masse d'une manière considérable de l'ordre de 27% par rapport à celle de mortier de référence. On remarque aussi que la durée de commencement de perte en masse est prolongée d'une manière proportionnelle au pourcentage de pouzzolane. Le mortier de référence commence la perte de masse à 28 jours, par contre, le mortier avec 15% de pouzzolane commence le perte de masse à environ 120 jours.

L'examen visuel des échantillons en contact avec les acides est un moyen pour évaluer la détérioration des propriétés physiques et les dégradations en surface des éprouvettes.

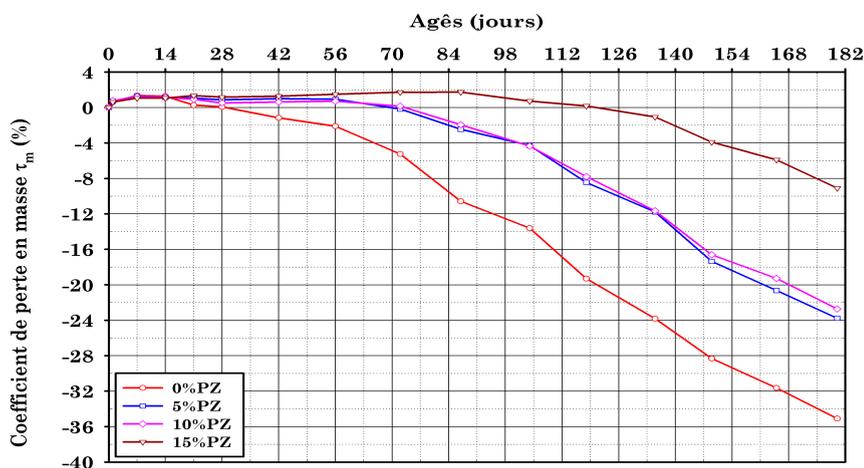


FIGURE 5.20 – Perte en masse des mortiers binaires immergés dans 2.5% de H_2SO_4

Les figures 5.21.(a) et 5.21.(b) représentent l'aspect d'un mortier de référence et un mortier avec 15% de pouzzolane naturelle après 6 mois d'immersion dans la solution de 2.5% H_2SO_4 . Après 6 mois d'immersion le mortier de référence est nettement dégradé par rapport au mortier avec 15% de pouzzolane.

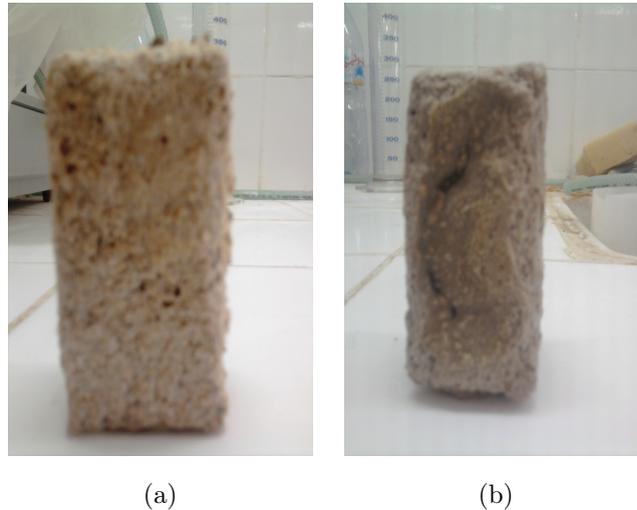


FIGURE 5.21 – Examen visuel des échantillons exposé à 2.5% de H_2SO_4 après 6 mois : (a) Mortier de référence 0%PZ (b) Mortier binaire 15%PZ

5.3.1.2 Mortiers ternaire à base de la pouzzolane et de la poudre de marbre

Les résultats des pertes en masses des mortiers ternaires en fonction du temps après exposition à l'attaque de l'acide sulfurique dans une solution contenant 2.5% de H_2SO_4 sont présentés dans la figure 5.22.

L'incorporation de la poudre de marbre avec la pouzzolane naturelle montre le net apport de l'amélioration de la résistance vis-à-vis de l'attaque sulfurique. Le mortier ternaire avec 5%PZ+15%MP présente la plus faible valeur de perte de masse de l'ordre de 2%, et que la durée de commencement de perte de la masse est prolongée jusqu'à 140 jours. Les pertes des masses sont de 20, 8.5 et 8 % pour les mortiers avec des teneurs respectives de 5%PZ+5%MP, 5%PZ+10%MP et 10%PZ+10%MP après 6 mois d'immersion.

Si on compare visuellement les mortiers de référence (0%PZ) et le mortier ternaire avec 5%PZ+15%MP (cf. Figure 5.23), on constate que le mortier de référence présente l'état la plus dégradé et que le mortier n'a pas perdu la forme initiale d'éprouvette par rapport au mortier de référence.

Mekhloufi et al. [140] ont montré que la perte de masse des mortiers quaternaires (Laitier + Pouzzolane + fillers calcaire) avec 30% de la pouzzolane et le mortier avec 30% de laitier est plus faible par rapport a celles des mortiers de référence et avec 30% des fillers calcaires exposé à 3% de H_2SO_4 .

Ghrici et al [13] ont trouvé que l'introduction de 15% des fillers calcaires et la combinaison de 20% de pouzzolane naturelle et 10% des fillers calcaires ont diminué la perte de masse par rapport au mortier de référence de 24% et 10% respectivement.

Said Mansour [141] à montré que la perte de masse de mortier avec 30% de métakaolin placé dans la solution de 2.5% de H_2SO_4 pendant 32 semaines a diminuer sa perte de masse de 28% par rapport au mortier témoin sans ajout qui présente 40% de perte de masse dans les mêmes conditions.

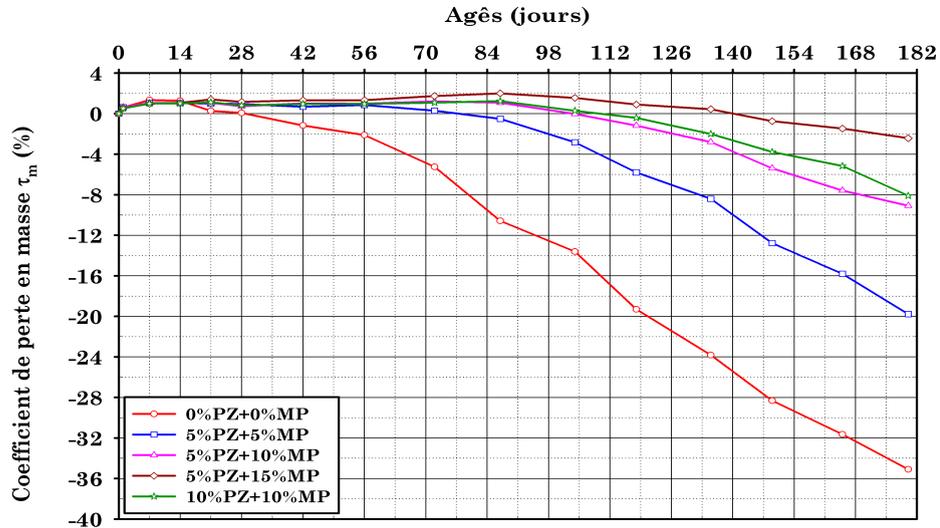


FIGURE 5.22 – Perte en masse des mortiers ternaires immergés dans 2.5% de H_2SO_4

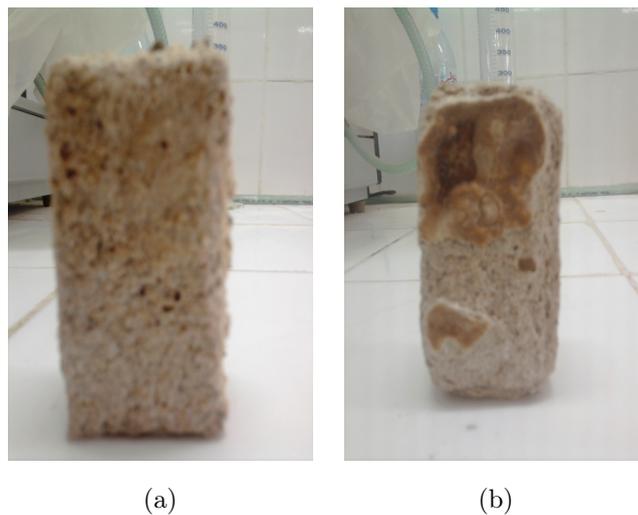


FIGURE 5.23 – Examen visuel des échantillons exposé à 2.5% de H_2SO_4 après 6 mois : (a) Mortier de référence 0%PZ (b) Mortier ternaire 5%PZ+15%MP

5.3.2 Attaque par l'acide chlorhydrique (Hcl)

5.3.2.1 Mortiers binaire à base de pouzzolane

Pour l'évaluation de comportement des mortiers autoplaçants binaires à base de la pouzzolane. La figure 5.24 illustre la variation de perte en masse des ces mortiers dans la solution de 1% Hcl pendant 6 mois.

On constate que la substitution du ciment par la pouzzolane naturelle a diminuer la quantité de mortier perdu pendant l'attaque par les acides chlorhydrique. On constate aussi que le comportement de tous les mortiers autoplaçant n'a pas affecté considérablement la perte de masse. Et le mortier de référence présente la plus grande valeur de l'ordre de 0.75%. Le mortier avec 5% de pouzzolane n'a pas subit aucun perte de mass, cela signifie la bonne résistance des mortiers autoplaçant vis-à-vis l'attaque chlorhydrique. Par contre, les mortiers avec 10 et 15% sont subit un légère perte de l'ordre de 0.5 et 0.38% après 24 semaines.

Cela et bien montré dans les figures 5.25.(a) et 5.25.(b), les éprouvettes présente un état sain de surface aucun signe d'expansion au dégradation.

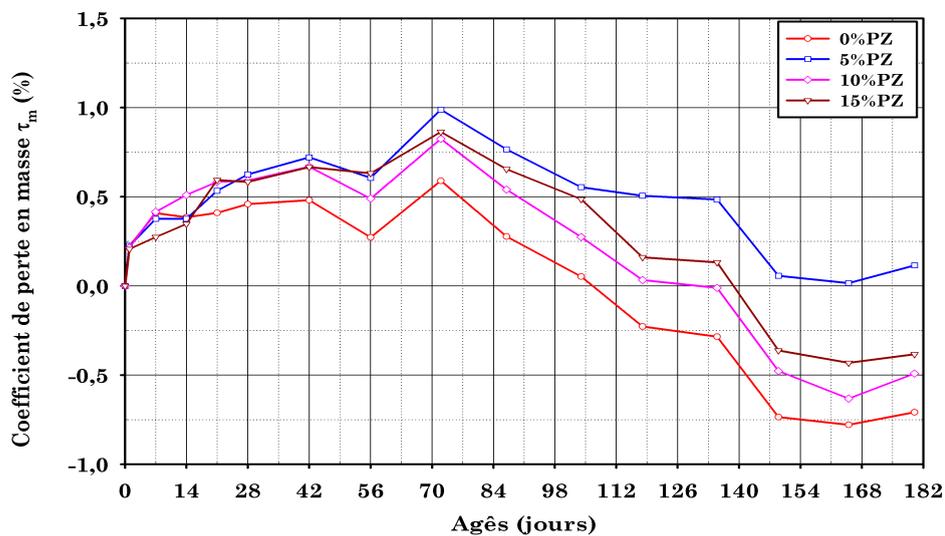


FIGURE 5.24 – Perte en masse des mortiers binaires immergés dans 1% de Hcl

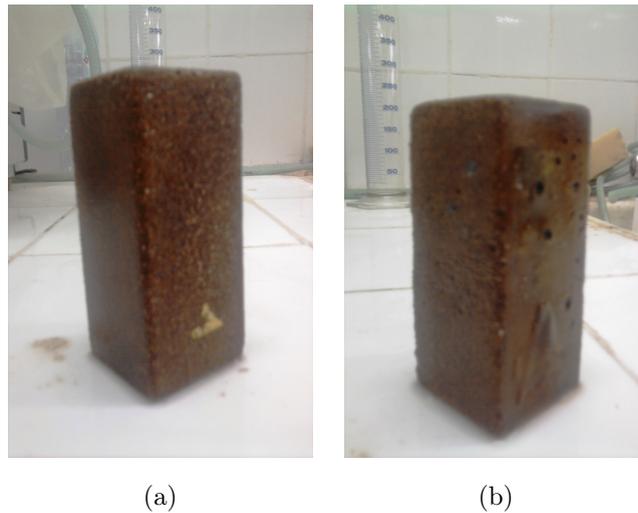


FIGURE 5.25 – Examen visuel des échantillons exposé à 1% de Hcl après 6 mois : (a) Mortier de référence 0%PZ (b) Mortier binaire 5%PZ

5.3.2.2 Mortiers ternaire à base de la pouzzolane et de la poudre de marbre

Un effet a été remarquer pour les mortiers ternaires (PZ+MP), la figure 5.26 montre que la combinaison des deux ajouts n'a pas apporté une nette amélioration dans ce type d'attaque, car les pertes de masse pour tous les mortiers varient entre 0.5 et 1.25% après 180 jours d'exposition d'attaque par Hcl. En général les mortiers autoplaçant prouve sa performance vis-à-vis l'attaque chlorhydrique.

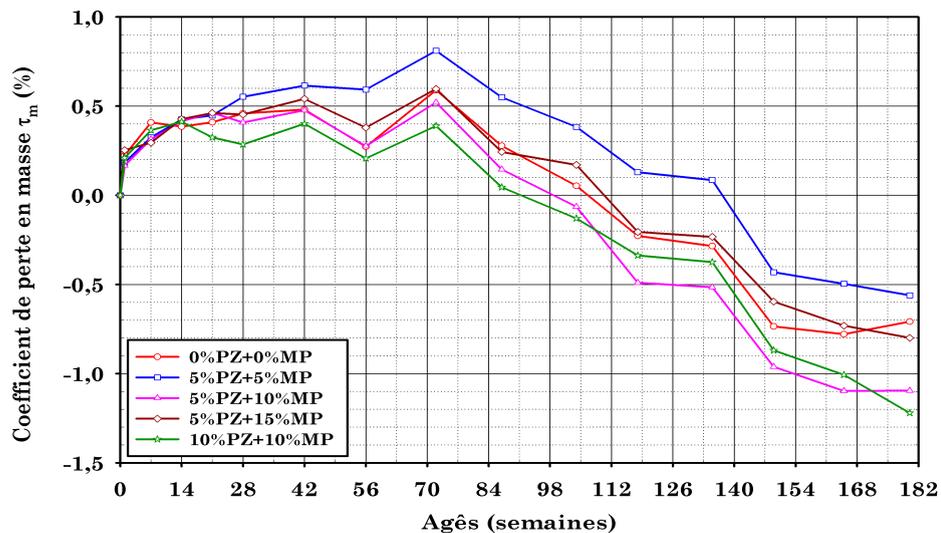


FIGURE 5.26 – Perte en masse des mortiers ternaires immergés dans 1% de Hcl

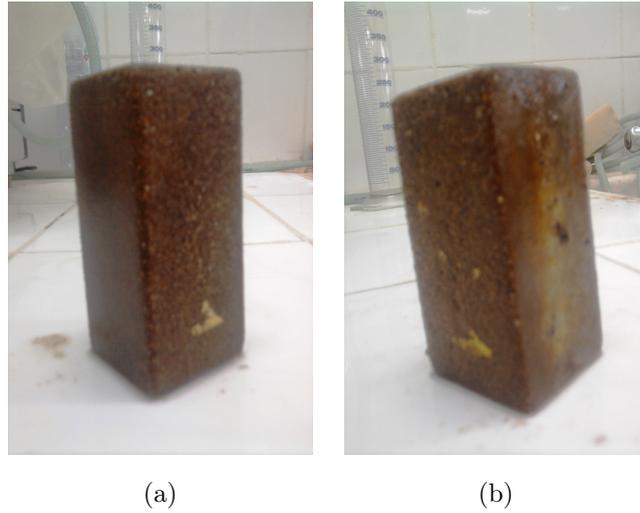


FIGURE 5.27 – Examen visuel des échantillons exposé à 1% de Hcl après 6 mois : (a) Mortier de référence 0%PZ (b) Mortier ternaire 5%PZ+5%MP

Les figures 5.27.(a) et 5.27.(b) montrent l'examen visuel des éprouvettes exposé à l'attaque par les acides chlorhydrique après 6 mois. On voit bien que les éprouvettes sont en bon état sans aucune dégradation apparente.

SYNTHÈSE DE LA DURABILITÉ DES MAP

Pour faire l'évaluation de la durabilité des bétons autoplacant on s'est basé sur l'étude de la durabilité des mortiers autoplacants uniquement, car la majorité des cas pathologiques des constructions en béton armé sont présents au niveau des mortiers dans le béton.

Pour cela on a fait appel à deux essais de durabilité connus :

- L'attaque externe par les sulfates de magnésium $MgSO_4$ et les sulfates de sodium Na_2SO_4 ;
- L'attaque externe par l'acide sulfurique H_2SO_4 et l'acide chlorhydrique HCl ;

Les résultats montrent que l'utilisation de 15% de la pouzzolane naturelle améliore la résistance vis-à-vis l'attaque par les sulfates de magnésium et les sulfates de sodium.

Dans le système ternaire l'utilisation de la poudre de marbre et de la pouzzolane naturelle améliore considérablement la résistance vis-à-vis l'attaque des sulfates de magnésium et des sulfates de sodium.

Les résultats d'essais de l'attaque par l'acide sulfurique montre un bon comportement de résistance pour les mortiers à base de pouzzolane naturelle vis-à-vis ce type d'attaque, et le mortier avec 15% présente la meilleur comportement.

Un effet similaire est remarqué pour les mortiers à base de pouzzolane exposés à une attaque par l'acide chlorhydrique mais avec une faible importance par rapport à l'attaque sulfurique.

Concernant les ciments ternaires (pouzzolane+poudre de marbre) l'effet de l'introduction de la poudre de marbre est nettement bénéfique et considérable vis-à-vis l'attaque par l'acide sulfurique.

CONCLUSIONS GÉNÉRALES

L'objectif principal de cette recherche est d'examiner l'effet de la substitution du ciment avec la pouzzolane naturelle (PZ) et la poudre de marbre (MP) sur les propriétés rhéologiques et mécaniques des mortiers autoplacants (MAP) et les bétons autoplacants (BAP). Le ciment Portland Ordinaire (CPA) a été partiellement remplacé par différents pourcentages de la pouzzolane naturelle (5-25%) et de la pouzzolane et de la poudre de marbre (10-50%). Les différents essais rhéologiques réalisés tel que l'essai d'étalement, l'essai de temps d'écoulement de V-funnel, de J-Ring, la Boîte en L et de l'essai de stabilité à tamis, ont permis d'une part de mettre en évidence le comportement à l'état frais des mortiers et bétons autoplacants et d'autre part de confirmer les possibilités d'élaborer des MAP et des BAP à base de matériaux locaux en particulier la pouzzolane naturelle et la poudre de marbre.

Le béton autoplacant offre plusieurs avantages techniques, économiques et environnementaux. Cependant, sa formulation à base de matériaux locaux nécessite une étude particulière et précise, afin de bien pouvoir le concrétiser. Le choix de la méthode n'était pas évident et dépendait de la disponibilité ou non des matériaux adéquats surtout en termes de superplastifiants et agents de viscosité.

Suite à cette étude, nous avons pu tirer un certain nombre de conclusions relatives au comportement physico-mécanique et la durabilité des mortiers et bétons autoplacants. Parmi ces résultats on peut citer :

- L'étude a montré la possibilité de l'utilisation de la méthode Okamura pour l'élaboration des mortiers ou des bétons autoplacants à base des matériaux locaux, avec un volume de sable dans les différents mélanges de 50% ;
- Une bonne corrélation a été établie pour entre le comportement rhéologique des mortiers autoplacants et les bétons autoplacants surtout au niveau de la formulation.
- Un dosage de 0.9% de superplastifiant à base de polycarboxylates semble être suffisant pour avoir des comportements rhéologiques adéquats ;
- L'incorporation de la pouzzolane naturelle seule (5-15%) améliore l'ouvrabilité des mortiers et des bétons autoplacants, Par contre, l'utilisation de plus de 15% de la

pouzzolane affecte négativement l'ouvrabilité ;

– La substitution de la poudre de marbre seule a apporter un effet bénéfique sur l'ouvrabilité des mortiers autoplaçants (MAP) ;

– La combinaison de la pouzzolane naturelle et la poudre avec deux système de substitution (PZ/MP=1 et PZ/MP=1/3) a améliorer le comportement rhéologique des mélanges ternaires pour des teneurs de 10-40% pour le premier système et 10-50% pour le deuxième système ;

– L'augmentation des teneurs en pouzzolane provoque la diminution de la résistance à la compression des BAP ;

– La réaction pouzzolanique poursuit son développement au cours du temps, ce qui permis l'augmentation de la résistance à la compression à long terme (90 jours) pour les bétons à base de pouzzolane naturelle ;

– La résistance à la compression à 90 jours des mortiers ternaires (PZ/MP=1) avec des teneurs de 10 à 20% est comparable a celle du béton référence ;

– L'utilisation de la pouzzolane diminue la température d'hydratation des mortiers autoplaçants par rapport au mortier de référence ;

– L'utilisation de 10% de pouzzolane diminue la quantité de chaleur cumulée dans les mortiers autoplaçants.

– La substitution du ciment par la pouzzolane naturelle accélère le dégagement de la chaleur d'hydratation, et par conséquent diminue la durée de la période dormante ;

– L'introduction de la poudre de marbre avec la pouzzolane naturelle diminue considérablement la température d'hydratation au cours du temps ;

– L'utilisation de 15% de pouzzolane naturelle améliore la résistance vis-à-vis de l'attaque des sulfates de magnésium et des sulfates de sodium ;

– L'utilisation d'une quantité supérieure à 10% de poudre de marbre combinée avec la pouzzolane naturelle augmente significativement la résistance aux attaques des sulfates de magnésium ;

– L'association de la poudre de marbre avec la pouzzolane naturelle apporte un effet bénéfique sur la résistance aux attaques des sulfates de sodium ;

– La substitution partielle de ciment par la pouzzolane naturelle seule ou la pouzzolane naturelle avec la poudre de marbre améliore la résistance aux attaques des acides sulfurique H_2SO_4 ;

PERSPECTIVES ET RECOMMANDATIONS

Les travaux effectués dans le cadre de cette thèse ont été focalisés sur à l'étude de l'effet de la pouzzolane naturelle et de la poudre de marbre sur les propriétés rhéologiques et mécaniques et la durabilité des BAP. D'autres aspects restent à élucider et par conséquent, nous recommandons, pour de futurs travaux, ce qui suit :

- Confection et élaboration de BAP avec d'autres types des ajouts que ce soit ternaire où quaternaire ;
- Elargir l'étude rhéologique pour déterminer d'autres caractéristiques telles que, le seuil de cisaillement, taux de cisaillement, viscosité des mélange en utilisant un rhéomètre de mortier et du béton ;
- Caractérisation des BAP à l'état durci par la détermination d'autres caractéristiques tel que, le module d'élasticité, le retrait et le fluage ;
- Réaliser d'autres essais sur la durabilité parmi les quels la perméabilité aux gaz et à l'eau, la carbonatation et la pénétration des ions chlore ;
- Les bétons autoplaçants étant très fluides, il serait intéressant de mener des études sur leur pompabilité ;

ANNEXES

ANNEXE A

EXEMPLE DE CALCUL DE COMPOSITION DU MORTIER

A.1 Les Données

Les masse volumiques absolues des constituants :

- Ciment : $\rho_c=3150 \text{ kg/m}^3$;
- Pouzzolane : $\rho_{pz}=2600 \text{ kg/m}^3$;
- Poudre de marbre : $\rho_{mp}=2700 \text{ kg/m}^3$;
- Sable : $\rho_s=2612 \text{ kg/m}^3$;
- Superplastifiant : $\rho_{sp}=1070 \text{ kg/m}^3$;
- Eau : $\rho_e=1000 \text{ kg/m}^3$;

Coefficient d'absorption du sable $A_{bs}=0.58$

Le rapport Sable/mortier (S/M)=0.5

Le rapport E/Liant (E/L)=0.4 en poids Le superplastifiant (MEDAFLOW30) est de 30% extrait (contient 70% d'eau), le dosage en superplastifiant sera de : %Sp=0.9% du poids de liant.

A.2 Calcul d'humidité du sable

La teneur en eau de sable se calcule suivant la formule suivante :

$$W_s = \frac{M_h - M_s}{M_s} \cdot 100 \quad (\text{A.1})$$

où :

M_s : la masse sèche de sable en gramme ;

M_h : la masse humide de sable en gramme ;

Donc le sable contient une certain quantité d'eau qu'on doit retrancher de son coefficient d'absorption on l'appelle correction :

$$\text{Correction} = W_s - A_{bs} \quad (\text{A.2})$$

A.3 Calcul des quantités de chaque constituantA.3.1 Ciment

Le pourcentage en volume du ciment :

$$C_{vol}(\%) = \frac{\left(1 - \frac{S}{M}\right)}{\left(1 + \frac{E}{C_{par\ volume}}\right)} \cdot 100 \quad (\text{A.3})$$

La quantité de ciment C en kilogrammes :

$$C(kg) = \frac{\left(V \cdot \frac{E}{C_{par\ volume}}\right)}{100} \cdot \rho_c \quad (\text{A.4})$$

A.3.2 Sable

La quantité de sable S en kilogrammes :

$$S(kg) = \left(1 + \frac{Correction}{100}\right) \cdot \left(\frac{V \cdot \frac{S}{M} \cdot \rho_s}{100}\right) \quad (\text{A.5})$$

A.3.3 Superplastifiant

La quantité de superplastifiant est SP :

$$Sp(kg) = \frac{Sp(\%) \cdot C}{100} \quad (\text{A.6})$$

A.3.4 Eau

L'eau ajoutée au mortier (E) est divisée en deux parties une première partie E_1 , qui est de 70% de la quantité d'eau globale, qu'on ajoute lors du malaxage durant la première minute et la deuxième quantité E_2 (30% de la quantité d'eau globale) est mélangée avec l'adjuvant est ajouté au mélange du mortier dans la deuxième minute du malaxage qui suit la première.

Le pourcentage d'eau en volume :

$$E(\%) = \frac{\left(1 - \frac{S}{M}\right) \cdot 100 \cdot \frac{E}{C_{par\ volume}}}{\left(1 + \frac{E}{C_{par\ volume}}\right)} \quad (\text{A.7})$$

La quantité d'eau globale E en litre :

$$E = \left(\frac{V \cdot E(\%)}{100} \cdot \frac{\rho_e}{1000}\right) - \left(\frac{Sp \cdot 70}{100}\right) - \left(\frac{V \cdot \frac{S}{M} \cdot \rho_s \cdot Correction}{100} \cdot \frac{1}{100}\right) \quad (\text{A.8})$$

avec :

$$E_1 = 0,7 \cdot E \quad \text{et} \quad E_2 = 0,3 \cdot E$$

Feuille de calcul par Excel des différents constituant du mortier autoplaçant

Composition et résultats des essais sur mortier

Essais sur Mortier

Entré les données dans les cellules en rouge

Valeurs calculées dans cellules en noir

Référence du mélange

Essai N°

CEM I 42,5 +Date **09/02/2012**

0

% de pozzoulane

0

% de Poudre de Marbre

volume de mortier (litres)

1000,00

sable/mortier vol

0,50

E/P par vol.

1,26

poudre vol (%)

22,124

Eau volume (%)

27,876

composition Poudre(vol %)

type

Résultats

Ciment portland**100**

Etalement (cm)

Pozzoulane**0****Poudre de Marbre****0**

Temps d'écoulement (sec)

superplast - MEDAFLOW30

0,9

% (Sp/P)

Densité relative

3,15

teneur en eau du sable

	humidité (%ab)	absorption(%)	correction (%)
poids humide (gms)	200	0,00	-0,58
poids sec (gms)	200		

Materiaux	Volume litres	Densité kg/m ³	Masse kg	Contenance d'eau		poids mélange kg
				%	kg	
poudre	221,239	3150	696,903			696,903
Ciment	221,239	3150	696,903			696,903
Pozzoulane	0,000	2612	0,000			0,000
Poudre de Marbre	0,000	2700	0,000			0,000
Eau	278,761	1000	278,8			282,056 W1 <u>197,439</u> W2 <u>84,617</u>
superplastifiant MEDAFLOW 30		1070	6,27	70	4,390	6,272
Sable	500,000	2650	1325,000	-0,58	-7,685	1325,000
Total	1000,000					2310,230

E/P poids = **0,4000**

	1,2 Volume (l)	poids mélange g	
poudre		836,283	
Ciment	0,265	836,28	
Pozzoulane	0,000	0,00	
Calcaire	0,000	0,00	
Eau efficace	0,3345	338,47	W1 <u>236,9</u>
	E theorique	334,51	W2 <u>101,5</u>
superplastifiant MEDAFLOW 30		7,53	
Sable	0,6000	1590,0	
Total	1,2000	2772,3	

ANNEXE B

RÉSULTATS DES ESSAIS DE LA CHALEUR D'HYDRATATION POUR MORTIER

B.1 Calcul de la chaleur d'hydratation

B.1.1 principe des calculs

la chaleur d'hydratation, Q , exprimée en joules par grammes de ciment, au temps écoulé, t , est calculée au moyen de l'équation suivante :

$$Q = \frac{C}{m_c} \Delta\theta_t + \frac{1}{m_c} \int_0^t \alpha \cdot \Delta\theta_t \cdot dt \quad (\text{B.1})$$

où :

m_c : est la masse de ciment contenu dans l'échantillon d'essai, en grammes ;

t : est la durée d'hydratation, en heures ;

C : est la capacité thermique totale du calorimètre en joules par kelvin ;

α : est le coefficient de déperdition thermique totale du calorimètre en joules par kelvin ;

θ_t : est la différence de température entre le calorimètre d'essais de référence à l'instant t , en kelvin ;

Le premier terme de l'équation (B.1) représente la chaleur accumulée dans le calorimètre A, le second la chaleur dissipée vers le milieu ambiant B (en joules par grammes de ciment).

L'équation (B.1) peut être simplifiée en équation (B.2) :

$$Q = \frac{C}{m_c} \theta_t + \frac{1}{m_c} \sum_{i=1}^n \bar{\alpha}_i \cdot \bar{\theta}_i \cdot \Delta t_i \quad (\text{B.2})$$

où $\bar{\alpha}_i$ et $\bar{\theta}_i$ sont les valeurs moyennes du coefficient de déperdition thermique et de la différence de température entre le calorimètre d'essais et le calorimètre de référence pendant la période Δt_i .

B.2 Calcul de la chaleur accumulée dans le calorimètre

Calcul de la chaleur accumulée dans le calorimètre, A, en joules par grammes de ciment, à partir de la capacité thermique totale du calorimètre, C , de la masse du ciment, m_c et de la différence de température entre le calorimètre d'essais et le calorimètre de

référence, θ_t , à l'instant t , à l'aide de l'équation (B.3) :

$$A = \frac{C}{m_c} \theta_t \quad (\text{B.3})$$

où la capacité thermique totale du calorimètre, C , y compris la boîte à mortier et l'échantillon de mortier soumis à l'essai, est calculée par l'équation (B.4) :

$$C = 0,8.(m_c + m_s) + 3,8.m_w + 0.5m_b + \mu \quad (\text{B.4})$$

où :

m_s : est la masse de sable, en grammes ;

m_w : est la masse d'eau, en grammes ;

m_b : est la masse de la boîte à mortier vide avec le couvercle, en grammes ;

μ : est la capacité thermique du calorimètre à vide, en joule par kelvin ;

B.3 Calcul de la chaleur dissipée vers le milieu ambiant

Le calcul de la déperdition thermique pour des période d'hydratation connues représentées par les intervalles de temps s'écoulent entre des mesures successives de la température de l'échantillon d'essai.

Le coefficient de déperdition thermique du calorimètre, α , exprimé en joules par heure et par kelvin est donné par l'équation (B.5) :

$$\alpha = a + b.\theta \quad (\text{B.5})$$

a et b sont les constantes d'étalonnage du calorimètre ;

θ : est la différence de température entre le calorimètre d'essais et le calorimètre de référence, en kelvins.

La déperdition thermique vers le milieu ambiant, B , en joules par grammes de ciment, pendant la période d'hydratation, t_n est donnée par l'équation (B.6) :

$$B = \frac{1}{m_c} \sum_{i=1}^n \bar{\alpha}_i \cdot \bar{\theta}_i \cdot \Delta t_i \quad (\text{B.6})$$

où :

Δt_i : est le temps écoulé entre la mesure de température à l'instant t_{i-1} et la mesure suivante à t_i en heures ;

$\bar{\theta}_i$: est la différence de température entre le calorimètre d'essais et le calorimètre de référence, entre les instants t_i et t_{i-1} , en kelvins, donnée par l'équation (B.7) :

$$\bar{\theta}_i = \frac{\theta_i + \theta_{(i-1)}}{2} \quad (\text{B.7})$$

$\bar{\alpha}_i$: est le coefficient moyen de déperdition thermique totale du calorimètre au cours de l'intervalle Δt_i , en joules par heure, donnée par l'équation (B.8) :

$$\bar{\alpha}_i = a + b.\bar{\theta}_i \quad (\text{B.8})$$

B.4 Calcul de la chaleur d'hydratation

Le calcul de la chaleur d'hydratation, Q , exprimée en joules par grammes de ciment, comme la somme de la chaleur accumulée dans le calorimètre et la chaleur dissipée vers le milieu ambiant comme suit :

$$Q = A + B \quad (\text{B.9})$$

B.5 Flux de chaleur

Le flux de chaleur , F , exprimée en joules par grammes de ciment par heure, c'est la dérivé de la chaleur d'hydratation par rapport au temps, est ce calcul comme suit :

$$F_i = \frac{dQ}{dt} = \frac{Q_{i+1} - Q_i}{t_{i+1} - t_i} \quad (\text{B.10})$$

TABLE B.1 – Valeurs de température des mélanges de mortier binaires en fonction du temps

Temps (heures)	0%PZ	5%PZ	10%PZ	15%PZ	20%PZ
0	21,77	22,56	22,23	22	23,35
2	22,5	22,9	22,71	22,87	23,86
4	22,77	23,17	22,93	23,35	24,47
6	23,17	23,77	23,62	24,57	26,19
8	24,07	25,38	25,36	27,12	29,23
10	26,21	28,66	28,31	30,95	33,44
12	29,99	33,58	32,24	36,02	38,12
14	35,26	39,4	36,75	40,13	40,81
16	40,49	42,99	39,61	42,13	42,11
18	43,39	44,77	40,87	43,13	42,87
20	44,97	45,69	41,5	43,75	43,29
22	45,81	46,19	41,86	44,06	43,51
24	46,29	46,46	42,04	44,21	43,58
26	46,44	46,65	42,09	44,29	43,53
28	46,55	46,66	42,05	44,17	43,42
30	46,53	46,56	41,94	43,99	43,27
32	46,34	46,39	41,78	43,77	43,07
34	46,11	46,13	41,59	43,48	42,81
36	45,75	45,79	41,36	43,16	42,53
38	45,39	45,4	41,09	42,78	42,23
40	44,85	44,93	40,8	42,37	41,9
42	44,35	44,39	40,46	41,94	41,53
44	43,77	43,8	40,09	41,45	41,15
46	43,09	43,15	39,7	40,9	40,74
48	42,41	42,47	39,28	40,36	40,28
50	41,75	41,76	38,84	39,79	39,81
52	41	41,03	38,37	39,2	39,34
54	40,27	40,29	37,89	38,6	38,84
56	39,54	39,55	37,39	37,97	38,33
58	38,84	38,82	36,89	37,35	37,82
60	38,12	38,11	36,37	36,73	37,31
62	37,42	37,41	35,85	36,11	36,79
64	36,75	36,73	35,33	35,5	36,29
66	36,12	36,07	34,81	34,9	35,79
68	35,49	35,44	34,31	34,32	35,3
70	34,91	34,83	33,81	33,74	34,82

Temps (heures)	0%PZ	5%PZ	10%PZ	15%PZ	20%PZ
72	34,31	34,24	33,32	33,18	34,36
74	33,76	33,67	32,83	32,63	33,9
76	33,22	33,13	32,37	32,12	33,47
78	32,72	32,6	31,92	31,62	33,04
80	32,24	32,1	31,48	31,13	32,64
82	31,78	31,62	31,05	30,67	32,24
84	31,33	31,16	30,64	30,23	31,87
86	30,91	30,72	30,25	29,81	31,51
88	30,52	30,3	29,87	29,4	31,17
90	30,14	29,89	29,5	29,01	30,85
92	29,77	29,51	29,15	28,65	30,54
94	29,43	29,14	28,82	28,29	30,24
96	29,11	28,79	28,5	27,95	29,95
97,33	28,9	28,57	28,29	27,73	29,77

TABLE B.2 – Valeurs de température des mélanges de mortier ternaire en fonction du temps

Temps (heures)	0%PZ 0%MP	5%PZ 5%MP	5%PZ 10%MP	5%PZ 15%MP	10%PZ 10%MP	10%PZ 20%MP	10%PZ 30%MP
0	21,77	21,6	21,88	21,12	21,47	23,03	21,24
2	22,5	22,99	22,15	21,95	22,67	23,38	22,38
4	22,77	23,3	22,35	22,28	23,06	23,67	22,74
6	23,17	23,79	22,86	22,99	24,07	24,75	23,5
8	24,07	25,04	24,24	24,79	26,43	26,85	25,04
10	26,21	27,54	27	28,02	30,03	29,69	27,18
12	29,99	31,1	30,97	32,58	34,67	33,18	29,76
14	35,26	35,43	35,58	37,24	38,28	35,76	32,17
16	40,49	38,77	38,82	40,08	39,84	37,04	33,61
18	43,39	40,38	40,37	41,5	40,57	37,73	34,4
20	44,97	41,08	41,09	42,22	40,98	38,14	34,87
22	45,81	41,43	41,49	42,64	41,19	38,37	35,13
24	46,29	41,58	41,7	42,85	41,27	38,49	35,25
26	46,44	41,61	41,78	42,93	41,24	38,5	35,29
28	46,55	41,55	41,77	42,91	41,13	38,44	35,27
30	46,53	41,41	41,67	42,81	40,97	38,32	35,19
32	46,34	41,24	41,53	42,65	40,75	38,15	35,06
34	46,11	41,02	41,32	42,42	40,5	37,94	34,89
36	45,75	40,77	41,07	42,14	40,21	37,71	34,69
38	45,39	40,49	40,78	41,8	39,88	37,45	34,47
40	44,85	40,18	40,45	41,43	39,53	37,18	34,22
42	44,35	39,84	40,08	41	39,14	36,88	33,96
44	43,77	39,48	39,68	40,55	38,72	36,58	33,69
46	43,09	39,1	39,25	40,06	38,29	36,26	33,4
48	42,41	38,69	38,8	39,54	37,84	35,93	33,11
50	41,75	38,28	38,33	39,01	37,37	35,59	32,8
52	41	37,85	37,85	38,46	36,9	35,26	32,49
54	40,27	37,4	37,35	37,91	36,41	34,91	32,18
56	39,54	36,95	36,84	37,34	35,92	34,57	31,87
58	38,84	36,48	36,33	36,78	35,44	34,22	31,55
60	38,12	36,02	35,82	36,21	34,95	33,87	31,24
62	37,42	35,55	35,31	35,66	34,46	33,52	30,93
64	36,75	35,08	34,8	35,12	33,98	33,18	30,63
66	36,12	34,62	34,3	34,59	33,51	32,84	30,32
68	35,49	34,16	33,8	34,07	33,06	32,5	30,02

Temps (heures)	0%PZ 0%MP	5%PZ 5%MP	5%PZ 10%MP	5%PZ 15%MP	10%PZ 10%MP	10%PZ 20%MP	10%PZ 30%MP
70	34,91	33,7	33,32	33,57	32,61	32,17	29,72
72	34,31	33,26	32,84	33,08	32,17	31,85	29,43
74	33,76	32,82	32,38	32,6	31,75	31,52	29,14
76	33,22	32,4	31,93	32,15	31,34	31,21	28,86
78	32,72	31,99	31,49	31,71	30,95	30,91	28,58
80	32,24	31,6	31,06	31,29	30,57	30,62	28,32
82	31,78	31,21	30,65	30,89	30,2	30,33	28,05
84	31,33	30,85	30,26	30,5	29,84	30,06	27,79
86	30,91	30,49	29,88	30,13	29,5	29,8	27,55
88	30,52	30,14	29,51	29,77	29,17	29,54	27,3
90	30,14	29,81	29,15	29,43	28,86	29,3	27,07
92	29,77	29,5	28,81	29,11	28,56	29,06	26,84
94	29,43	29,19	28,49	28,79	28,27	28,84	26,62
96	29,11	28,9	28,17	28,49	27,99	28,62	26,4
98	28,79	28,62	27,87	28,2	27,73	28,42	26,19
100	28,5	28,35	27,57	27,93	27,48	28,23	25,99
102	28,22	28,1	27,29	27,67	27,23	28,04	25,72
104	27,94	27,85	27,02	27,42	27	27,86	25,54
106	27,69	27,62	26,76	27,18	26,77	27,69	25,35
108	27,45	27,39	26,51	26,95	26,56	27,54	25,18
110	27,21	27,17	26,27	26,74	26,36	27,39	25,01
112	26,99	26,97	26,05	26,52	26,16	27,26	24,85
114	26,78	26,77	25,83	26,32	25,97	27,2	24,7
116	26,58	26,58	25,62	26,13	25,79	27,15	24,55
116,67	26,52	26,52	25,55	26,07	25,73	27,13	24,5

ANNEXE C

EXEMPLE DE CALCUL DE COMPOSITION DU BÉTON

C.1 Les Données

Les masse volumiques absolues des constituants :

- La masse volumique absolue de gravier : $\rho_g=2700 \text{ kg/m}^3$;
- La masse volumique absolue de sable : $\rho_s=2612 \text{ kg/m}^3$;
- La masse volumique absolue de ciment : $\rho_c=3150 \text{ kg/m}^3$;
- La masse volumique absolue de pouzzolane : $\rho_{pz}=2600 \text{ kg/m}^3$;
- La masse volumique absolue poudre de marbre : $\rho_{mp}=2700 \text{ kg/m}^3$;
- Superplastifiant : $\rho_{sp}=1070 \text{ kg/m}^3$;
- Eau : $\rho_e=1000 \text{ kg/m}^3$;

Coefficient d'absorption du sable $A_{bs}=0.58$

Coefficient d'absorption du gravier $A_{bg}=2.52$

Le rapport Sable/mortier (S/M)=0.5

Le rapport E/Liant (E/L)=0.4 en poids.

Le superplastifiant (MEDAFLOW30) est de 30% extrait (contient 70% d'eau), le dosage en superplastifiant sera de : %Sp=0.9% du poids de liant.

Le pourcentage du gravier est de 50% de sa densité apparente donc son dosage sera de :

$$G(\text{kg/m}^3) = \frac{\rho_g \cdot 50}{100} \quad (\text{C.1})$$

Le volume d'air dans le béton en pourcentage :A=1% du volume de béton

C.2 Calcul d'humidité

La procédure de calcul de la teneur en eau est déjà mentionné dans l'annexe A, seulement pour le béton il faut calculé la teneur en eau de gravier W_g .

C.3 Calcul des différents composants

C.3.1 Gravier

La quantité G en kilogrammes du gravier nécessaire pour un volume de béton V :

$$G(\text{kg}) = \frac{G(\text{kg/m}^3) \cdot V}{1000} \left(1 + \frac{W_g - A_{bg}}{100} \right) \quad (\text{C.2})$$

C.3.2 Sable

Pour calculer la quantité du sable dans le béton on calcule avant tout le pourcentage du gravier dans le béton (%G), le pourcentage du mortier par rapport au béton (%M) puis le pourcentage du sable dans le béton (%S) pour arriver à la quantité du sable dans un volume V de béton (S) :

Le pourcentage du gravier G dans le béton :

$$G(\%) = \frac{G(kg/m^3).V}{\rho_g.10} \quad (C.3)$$

Le pourcentage du volume de mortier M par rapport au volume de béton :

$$M(\%) = 100 - G(\%) - A(\%) \quad (C.4)$$

Le pourcentage du sable S dans le béton :

$$S(\%) = \frac{M(\%).\frac{S}{M}}{100} \quad (C.5)$$

Quantité du sable S en (kg) pour un volume V de béton :

$$S(kg) = \frac{S(\%).\rho_s.V}{1000} \left(1 + \frac{W_s - A_{bs}}{100} \right) \quad (C.6)$$

d'où on peut obtenir le rapport G/S de notre composition

C.3.3 Superplastifiant

La quantité de superplastifiant est SP :

C.3.4 Ciment

Pourcentage de volume pâte dans le béton (%P) :

$$P(\%) = M(\%) - S(\%) \quad (C.7)$$

Pourcentage de ciment dans le béton (%C) :

$$C(\%) = \frac{1}{\left(1 + \frac{E}{C_{volume}} \right)} . P(\%) \quad (C.8)$$

La quantité de ciment C en (kg) pour un volume V de béton :

$$C(kg) = C(\%).\rho_c.\frac{V}{100} \quad (C.9)$$

C.3.5 Superplastifiant

Le dosage en superplastifiant par mètre cube de béton Sp (kg/m^3)

$$Sp(kg/m^3) = \frac{Sp(\%)}{10} . C(\%) . \rho_c \quad (C.10)$$

La quantité de superplastifiant Sp en (kg) pour un volume V de béton :

$$Sp(kg) = Sp(kg/m^3).V \quad (C.11)$$

C.3.6 Eau

L'eau ajoutée au mortier (E) est divisée en deux parties une première partie E_1 , qui est de 70% de la quantité d'eau globale, qu'on ajoute lors du malaxage durant la première minute et la deuxième quantité E_2 (30% de la quantité d'eau globale) est mélangée avec l'adjuvant est ajouté au mélange du mortier dans la deuxième minute du malaxage qui suit la première.

Le pourcentage d'eau dans le béton E(%) :

$$E(\%) = \frac{\left(\frac{E}{C_{volume}}\right)}{\left(1 + \frac{E}{C_{volume}}\right)} \cdot P(\%) \quad (C.12)$$

Calcul de l'eau contenue dans le sable, dans le gravier et dans le superplastifiant, cette eau (e) doit être extraite :

L'eau contenu dans le sable : e_1

$$e_1(kg) = \frac{S(\%).\rho_s.V}{1000} \cdot \left(\frac{W_s - A_{bs}}{100}\right) \quad (C.13)$$

L'eau contenu dans le gravier : e_2

$$e_2(kg) = \frac{G(kg/m^3).V}{1000} \cdot \left(\frac{W_g - A_{bg}}{100}\right) \quad (C.14)$$

L'eau contenu dans le superplastifiant : e_3

$$e_3(kg) = \frac{Sp(kg).80}{100} \quad (C.15)$$

L'eau à extraire (e) :

$$e = e_1 + e_2 + e_3 \quad (C.16)$$

D'où la quantité d'eau globale E en (kg) pour un volume (V) de béton :

$$E(kg) = \frac{E(\%).10.V}{1000} - e \quad (C.17)$$

avec :

$$E_1 = 0,7.E \quad \text{et} \quad E_2 = 0,3.E$$

Feuille de calcul par Excel des différents constituant du béton autoplaçant

Composition du béton

Entrée des données en rouge

Référence:

Date

09/02/2012

Mesures d'humidité

Densités relatives	Gravier	2,69	Absorptions (%)	Pds Humide			Pds sec	% Humidité
	Sable	2,6	Gravier 3/8	2,52	8/15	409,5	408,3	0,29
	Ciment	3,15	Gravier 8/15	2,52	3/8	304,4	303,9	0,16
pouzzolane	PZ	2,6	Sable	0,58	Sable	311,5	310,5	0,32
Poudre de Marbre	MP	2,7						

Gravier

Densité	1660	kg/m ³	% gravier	30,9	vol % de béton
percent	50	%	Gravier	830,0	kg/m3
8/15:3/8	2,00		8/15	553	kg/m3
			3/8	277	kg/m3

Air

Air	1	vol % de béton
-----	---	----------------

Sable

volume mortier	68,1	vol % de béton	% Sable	34,1	vol % de béton
Sable	50	vol % de mortier	Sable	885,9	kg/m3
			G/S	0,937	

Pate

volume	34,1	vol % de béton	% Eau	19,0	vol % de béton
E/P volume	1,26		Eau	190	kg/m3
Poudre	15,08	vol % de béton			
Ciment	100	vol % de poudre	Ciment	15,08	vol % de béton
			Ciment	475	kg/m3
Pouzzolane	0	vol % de poudre	% Fines 01	0,00	vol % de béton
			PZ	0	kg/m3
Poudre de Marbre	0	vol % de poudre	% Fines 02	0,00	vol % de béton
Densité relative poudre	3,15		MP	0	kg/m3
E/P Poids	0,400		Poudre	475	kg/m3
			E/C	0,400	

Superplastifiant: MEDAFLOW 30

dosage	0,9	% liquid de poudre	superplast	4,27	kg/m3
--------	-----	--------------------	------------	------	-------

Volume de Mélange (litres)

Volume de Mélange (litres)	40	litres			
Densité Béton	2385	kg/m3	Poids Mélange	95,40	kg

Poids Mélange

	prop.mél	Pds mél	absorption	humidité	extra eau	Poids	
	kg/m3	kg	%	%	kg	kg	g
Gravier 8/15	553	22,13	2,52	0,29	-0,49	21,64	21640,6
Gravier Gravier 3/8	277	11,07	2,52	0,16	-0,26	10,81	10806,0
Sable	886	35,44	0,58	0,32	-0,09	35,34	35344,0
Ciment CPA 42,5	475	19,00				19,00	18996,2
Pouzzolane	0	0,00				0,00	0,0
Poudre de Marbre	0	0,00				0,00	0,0
Eau	190	7,60					0,0
Superplastifiant	4,27	0,17		70	0,12	0,171	171,0
composition eau						8,32	Eau 1 70% 5,827 5826,5
							Eau 2 30% 2,497 2497,1
total	2385	95,4			-0,73	95,28	

ANNEXE D

PUBLICATION INTERNATIONALE

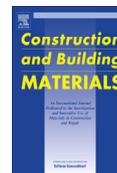
D.1 Publication internationale

A.S.E. Belaidi, L. Azzouz, E. Kadri and S. Kenai «**Effect of natural pozzolana and marble powder on the properties of self-compacting concrete** » Construction and Building Materials 31 (2012) 251-257



Contents lists available at SciVerse ScienceDirect

Construction and Building Materials

journal homepage: www.elsevier.com/locate/conbuildmat

Effect of natural pozzolana and marble powder on the properties of self-compacting concrete

A.S.E. Belaidi^a, L. Azzouz^b, E. Kadri^c, S. Kenai^{a,*}^a Geomaterials Laboratory, Civil Engineering Department, University of Blida, P.O. Box 270, Blida, Algeria^b Civil Engineering Laboratory, Department of Civil Engineering, University of Laghouat, P.O. Box 37G, Laghouat, Algeria^c Laboratory L2MGC, University of Cergy Pontoise, F9500 Cergy Pontoise, France

ARTICLE INFO

Article history:

Received 18 January 2011
 Received in revised form 30 December 2011
 Accepted 31 December 2011
 Available online 25 January 2012

Keywords:

SCC
 Natural pozzolana
 Marble powder
 Rheology
 Compressive strength

ABSTRACT

The objective of this investigation is to examine the effect of substitution of cement with natural pozzolana and marble powder on the rheological and mechanical properties of self-compacting mortar (SCM) and self compacting concrete (SCC). Ordinary Portland Cement (OPC) was partially replaced by different percentages of pozzolana and marble powder (10–40%). The workability of fresh SCC was measured using slump test, V-funnel flow time test, J-Ring, L-Box and sieve stability tests. Compressive strength was determined on prisms at the ages of 7, 28, 56 and 90 days. The results indicate an improvement in the workability of SCC with the use of pozzolana and marble powder. Compressive strength of binary and ternary SCC decreased with the increase in natural pozzolana and marble dust content, but strength at 28 and 90 days indicate that even with 40% (natural pozzolana + marble powder), suitable strength could be achieved.

© 2012 Elsevier Ltd. All rights reserved.

1. Introduction

SCC has been considered as a great development in construction field since its first use in Japan. Its introduction represents a major technological advance which led to a better quality of concrete, increased productivity and improved working environment on site [1].

The high fluidity is the main property of SCC so that it can be placed under its self-weight without vibration. In order to obtain a SCC of high flowability without segregation or bleeding during the transportation or placing, the use of high powder content, superplasticiser and viscosity modifying admixtures seems a good solution. However, the cost of such concrete is significantly higher [2]. The use of mineral additives such as silica fumes (SFs), fly ash (FA) and ground granulated blast-furnace slag (GGBFS) could reduce material cost and enhance the self-compatibility [3].

The use of these additions could also increase the fluidity of the concrete and may reduce the requirement of superplasticiser necessary to obtain a similar workability compared with the same concrete containing cement only [4]. In addition, the incorporation of these fine materials can enhance the grain size distribution and the particle packing, thus ensuring greater cohesiveness [5].

Park et al. [6] investigated the influence of GGBFS, FA and silica fume on the rheology of the pastes. Cementitious pastes were

designed as one component (PC), two components (PC–GGBFS, PC–FA, and PC–SF), and three components (PC–GGBFS–SF and PC–FA–SF) systems. It was found that for the three components systems the rheological properties of the cementitious pastes improved compared with the binary systems.

Sonebi [4] reported that incorporation of pulverised fuel ash and limestone powder reduced the requirement of SP necessary to achieve a suitable slump. Bouzoubaa and Lachemi [7] designed a SCC incorporating 50% of fly Ash.

Several studies [8–15] have shown that natural pozzolana have been widely used as a substitute for Portland cement in many applications because of its advantageous properties which include cost-reduction, reduction in heat evolution, decreased permeability and increased chemical resistance.

Marble powder (MP) which is an inert material obtained as an industrial by-product during sawing, shaping, and polishing of marble has also successfully been used as an addition in SCC and SCM. Marble powder used as mineral addition of cement is reported to improve some properties of fresh and hardened self-compacting concrete (SCC) [16,17].

No detailed investigation has been done to study the effect of a combination of both natural pozzolana and marble powder on the properties of cement mortar and concrete. This paper reports an experimental investigation on the effect of using both natural pozzolana and marble powder on the fresh and hardened properties of self compacting mortar (SCM) and SCC.

* Corresponding author. Tel.: +213 25 433939; fax: +213 21404921.

E-mail address: skennai@yahoo.com (S. Kenai).

2. Experimental program

2.1. Materials

The cement used in the present study was a CEMI 42.5. The mineral additives used are natural pozzolana (PZ) and marble powder (MP). The chemical and physical properties of cement, natural pozzolana and marble powder are given in Table 1 whereas the mineralogical composition of the cement is given in Table 2. The mineralogical compositions of natural pozzolana and marble powder were determined by X-ray diffraction and are presented in Figs. 1 and 2. In order to determine the surface characteristics of the mineral additives, scanning electron microscopy (SEM) was performed and typical secondary electron image is presented in Fig. 3. As seen on this figure, PZ presents angular shapes with rough surface texture.

A polycarboxylic-ether type superplasticiser (SP) with a specific gravity of 1.07 and a solid content of 30% was used. Continuously graded coarse aggregates (3/8 and 8/15 mm) were used in this study with a specific gravity and water absorption of 2.7% and 2.52% respectively. The fine aggregates were river sand with a specific gravity and water absorption of 2.6% and 0.58%, respectively. The gradations of the coarse and fine aggregates were determined by sieve analysis and are presented in Fig. 4.

2.2. Mix proportions

2.2.1. Mortar

Mortar serves as the basis for workability properties of SCC and its properties could be assessed by investigating self-compacting mortar (SCM) [18]. In fact, assessing the properties of SCMs is an integral part of SCC design [19].

In order to obtain the aimed properties of fresh SCC, a higher proportion of ultra-fine material and the introduction of mineral and chemical additions are necessary. The mixture proportions were based on Okamura and Ozawa [20] method, with improvements made on the method of selecting the fine aggregates content. The sand-mortar (V_s/V_m), the water-powder (V_w/V_p) and the superplasticiser-powder (SP/P) ratios were selected by a simple evaluation test for assessing the stress transferability of fresh mortar [18]. For the selection of air and coarse aggregate contents, Okamura and Ozawa [20] method is maintained. Tests on mortar have been carried out for constant water/powder (W/P) ratio of 0.4 by weight and constant sand/mortar (S/M) ratio of 0.5 by volume.

Mix proportions of mortar are shown in Table 3. Six superplasticiser dosages SP/P (%) = 0.8%, 0.9%, 1.0%, 1.1%, 1.2%, and 1.4% were used. PZ and MP were added as a substitution to cement by weight in the proportions of mortar with 5%, 10%, 15%, 20%, 25%, 30%, and 40%. Table 4 summarises the binary and ternary mortar mixture proportioning.

The mixing procedure of mortar consisted of mixing the fine aggregates with powder for half a minute before adding 70% of necessary water during 1 min then adding the remaining 30% of water containing the superplasticiser during another 1 min. The mixing procedure continues for 5 min, after that the mix is kept for setting for 2 min before remixing for just half a minute.

2.2.2. Concrete (SCC)

A total of 12 concrete mixtures were prepared having a constant water/powder ratio of 0.4 and total powder of 475 kg/m³. The control mixture included only OPC as the binder while the remaining mixtures incorporated binary (OPC + PZ) and ternary (OPC + PZ + MP) cementitious blends in which the OPC was replaced with PZ and MP. The replacement ratios for PZ were 5%, 10%, 15%, 20% and 25% while those of both PZ and MP were 10%, 15%, 20%, 30% and 40% by mass of total cementitious materials. The concrete mixture proportions are summarised in Table 5.

Table 1

Chemical and physical properties of cement, natural pozzolana and marble powder.

Chemical	Cement	Natural pozzolana	Marble powder
SiO ₂	21.7	46.8	1.0
CaO	65.7	9.2	52.6
MgO	0.7	3.8	2.1
Al ₂ O ₃	5.2	18.8	0.2
Fe ₂ O ₃	2.7	10.5	0.2
SO ₃	0.6	0.2	0.07
MnO	–	–	–
K ₂ O	0.4	0.5	0.04
TiO ₂	–	–	0.01
Na ₂ O	0.7	0.8	0.06
Cl	0.01	–	–
Loss of ignition	0.3	6.5	43.63
Specific density	3.15	2.6	2.7
Fineness (m ² /kg)	300	420	350

Table 2

Mineralogical composition of cement (%).

Element	Cement
C ₃ S	58.2
C ₂ S	18.5
C ₃ A	9.3
C ₄ AF	8.2

3. Concrete casting

The mixing procedure and time are very important, thus the mixing process was kept constant for all concrete mixtures. The batching sequence consisted of homogenising the powder and aggregates for 30 s in a rotary planetary mixer, then adding 70% of water and mixed for 1 min. Thereafter remaining water (30%) with SP was introduced, and the concrete was mixed for 5 min, then the mixing was stopped for 2 min and again the concrete was further mixed for 30 s before it was discharged from the mixer.

4. Testing

4.1. Mortar

Tests on fresh mortar include flow spread and V-funnel. In the flow spread test, the truncated cone mould is placed on plate, filled with mortar, and lifted. The subsequent diameter of the mortar is measured in two perpendicular directions, and the mean is taken. The funnel test for mortar, suggested by Okamura et al. [21] is used along with the flow spread test to select a suitable water-powder ratio in the mix design and to observe its variation with mix proportions. The V-funnel flow time is the time between opening the orifice and the first daylight appearing when looking vertically down through the funnel.

4.2. Concrete

In this investigation the filling ability was evaluated by slump flow, T500 flow time and V-funnel tests for SCC [19]. The passing ability was measured by the J-Ring and L-Box tests [22]. The resistance to segregation was measured by GTM sieve stability test [22].

For compressive strength tests, from each concrete mixture three prisms of 70 × 70 × 280 mm were cast. Specimens were left covered with a plastic sheet. After removal from moulds, at 24 h of age, concrete specimens were immersed in water saturated with lime at 20 °C until the age of testing. The compression test was conducted at the age of 7, 28, 56 and 90 days according to NFP 15-451 on the half samples obtained after the flexural test.

5. Results and discussion

5.1. Workability of mortars

The effect of superplasticiser on the slump flow and V-funnel flow time are given in Table 6 and Figs. 5 and 6. Slump increased with the increase in SP dosage. A superplasticiser dosage of 0.9% gave values of slump diameter and V-funnel flow time in the range (250–300 mm) suggested by Chai [23]. But dosages over 0.9% have shown some bleeding and some segregation. A dosage of 0.8% is outside the interval of values of V-funnel flow time proposed by [23]. Hence, a content of SP/P of 0.9% was adopted for all mortar and concrete mixtures with binary and ternary systems.

The effect of PZ and MP on the fresh properties of mortars made with binary and ternary systems is given in Table 7 and shown in Figs. 7–10. As can be seen from Table 7 and Fig. 7, that control OPC

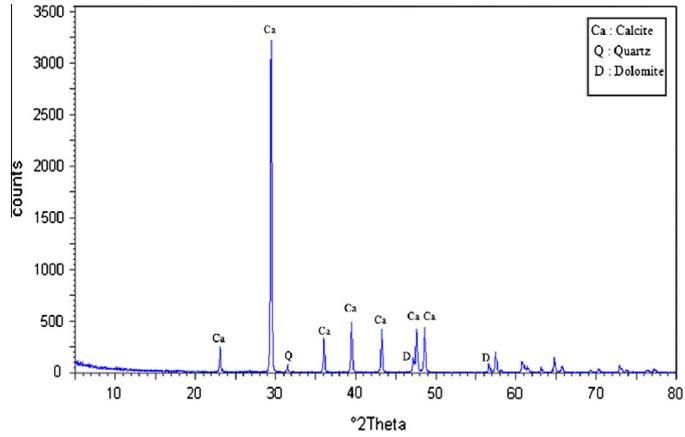


Fig. 2. X-ray diffraction of marble powder.

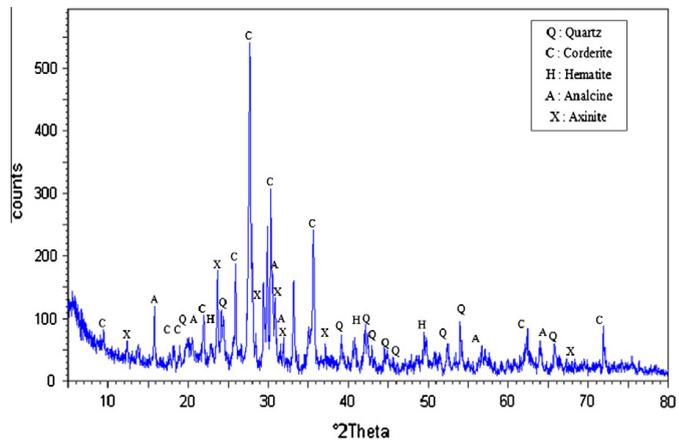


Fig. 1. X-ray diffraction of natural pozzolana.

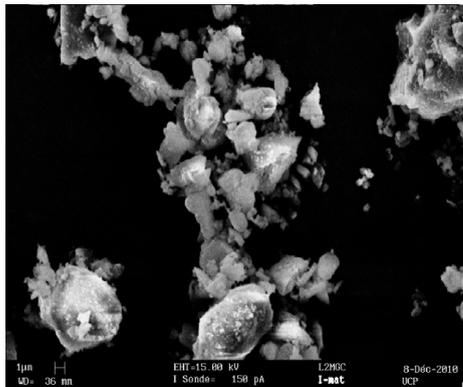


Fig. 3. Scanning electron microscopy (SEM) of natural pozzolana.

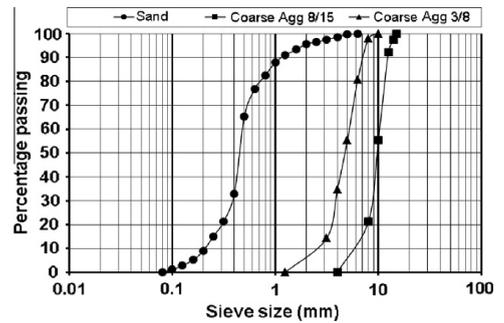


Fig. 4. Grading curves of sand, 3/8 and 8/15 coarse aggregate.

mortar gave a slump flow value of 287 mm whereas mortars made with 5%, 10%, 15%, 20% and 25% PZ had respectively slump values of 292, 287, 290, 257 and 141 mm. Results show that mixtures with more than 15% of PZ in binary systems, gave slump flow

values outside the limitation (250–300 mm) given by Chai [23] indicating that high content of PZ reduced remarkably the slump flow diameters of mortars.

Fig. 8 indicates that flow time of mortar increased with the increase in natural pozzolana, indicating an increase in viscosity. Control OPC mortar gave a V-funnel value of 5.37 s whereas mortars made with 5%, 10%, 15%, 20% and 25% PZ achieved respectively slump values of 4.18, 3.96, 4.14, 4.59 and 7.15 s.

Table 3
Mix proportions for mortar.

	M1	M2	M3	M4	M5	M6
Cement (kg/m ³)	696.6	696.6	696.6	696.6	696.6	696.6
Fine aggregate (kg/m ³)	1333.5	1333.5	1333.5	1333.5	1333.5	1333.5
Water (kg/m ³)	278.9	278.9	278.9	278.9	278.9	278.9
Superplasticiser (%)	0.8	0.9	1.0	1.1	1.2	1.4

Table 4
Binary and ternary mortar mixture proportioning.

Mix description	W/P	Water (kg/m ³)	Powder (kg/m ³)	OPC (kg/m ³)	PZ (kg/m ³)	MP (kg/m ³)	Sand (kg/m ³)	Superplasticiser (%)
Control OPC	0.4	279	697	697	0	0	1334	0.9
5 PZ		279	697	662	35	0		
10 PZ		279	697	627	70	0		
15 PZ		279	697	592	105	0		
20 PZ		279	697	558	139	0		
25 PZ		279	697	523	174	0		
5 PZ 5 MP		279	697	627	35	35		
5 PZ 10 MP		279	697	592	35	70		
10 PZ 10 MP		279	697	557	70	70		
5 PZ 15 MP		279	697	557	35	105		
15PZ 15 MP		279	697	487	105	105		
10PZ 30 MP		279	697	418	70	209		

Table 5
Concrete mixture proportioning.

Mix description	W/P	Water (kg/m ³)	Powder (kg/m ³)	OPC (kg/m ³)	PZ (kg/m ³)	MP (kg/m ³)	Sand (kg/m ³)	Coarse aggregate 3/8 (kg/m ³)	Coarse aggregate 8/15 (kg/m ³)	Superplasticiser (%)
Control OPC	0.4	190	475	475	0	0	886	277	553	0.9
5 PZ	0.4	190	475	451	24	0				
10 PZ	0.4	190	475	427	48	0				
15 PZ	0.4	190	475	404	71	0				
20 PZ	0.4	190	475	380	95	0				
25 PZ	0.4	190	475	356	119	0				
5 PZ 5 MP	0.4	190	475	427	24	24				
5 PZ 10 MP	0.4	190	475	403	24	48				
5 PZ 15 MP	0.4	190	475	380	24	71				
10 PZ 10 MP	0.4	190	475	380	48	48				
10 PZ 20 MP	0.4	190	475	332	48	95				
10PZ 30 MP	0.4	190	475	285	48	142				

Table 6
Fresh properties for mortar.

		M1	M2	M3	M4	M5	M6
Slump flow (mm)		268.5	287.5	290.5	291.5	294.5	308.0
V-funnel flow time (s)		10.77	5.37	5.72	5.30	5.08	4.76
Observation	Bleeding	No	No	Yes	Yes	Yes	Yes
	Segregation	No	No	No	No	Yes	yes

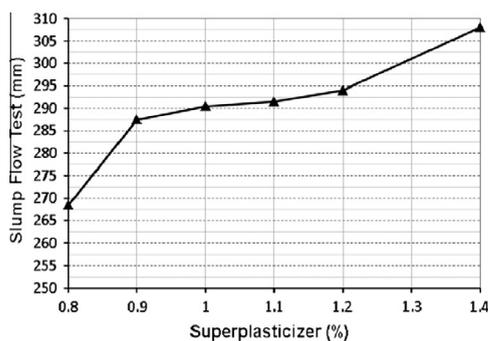


Fig. 5. Slump flow test for mortar.

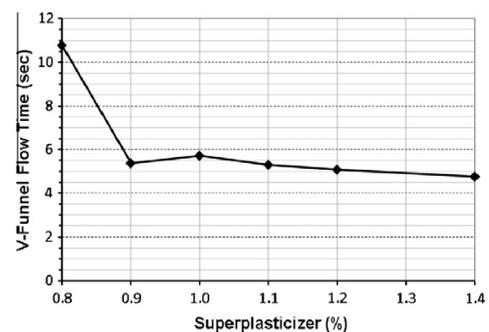


Fig. 6. V-funnel flow time for mortar.

Table 7
Fresh properties of binary and ternary mortar tests.

Mix description	Slump flow (mm)	V-funnel test (s)
Control OPC	287.5	5.37
5 PZ	292.0	4.18
10 PZ	287.0	3.96
15 PZ	290.0	4.14
20 PZ	257.0	4.59
25 PZ	141.0	7.15
5 PZ 5 MP	297.5	3.74
5 PZ 10 MP	300.0	3.01
5 PZ 15 MP	303.5	3.23
10 PZ 10 MP	293.0	3.74
10PZ 20 MP	300.5	3.16
10PZ 30 MP	307.5	2.82

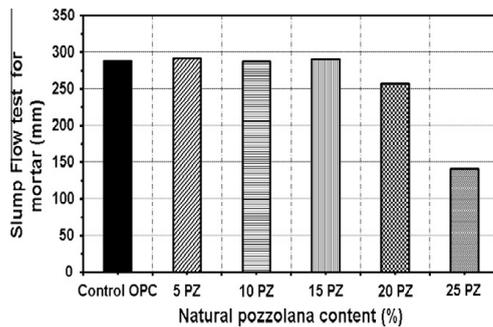


Fig. 7. Slump flow test vs. natural pozzolana content for mortar.

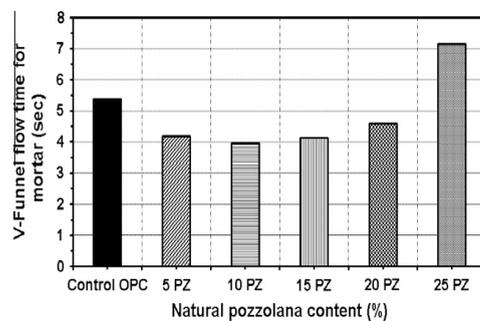


Fig. 8. V-funnel flow time vs. natural pozzolana content for mortar.

The use of MP increased remarkably the slump flow diameters of mortars. Control OPC mortar gave a slump flow value of 287 mm whereas mortars made with ternary cement gave slump values ranging from 293 to 308 mm (Fig. 9) and hence in the limit (250–300 mm) given by Chai [23] except for the mix (10PZ + 30MP).

Fig. 10 shows that flow time of mortar with ternary mixes decreases with the increase of MP, indicating that viscosity decreases. The V-funnel value for control OPC mortar was 5.37 s whereas mortars made with ternary system (PZ + MP) gave values ranging from 2.82 to 3.74 s.

5.2. Workability of SCC

The fresh properties of SCC namely: slump flow time (T50), slump flow diameter, V-funnel flow time, J-Ring, L-Box and sieve stability are presented in Table 8. Slump flow and V-funnel flow

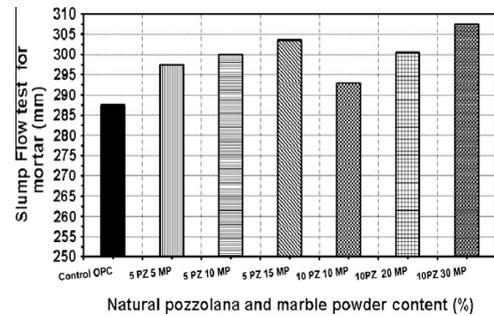


Fig. 9. Slump flow test for mortar with ternary cement.

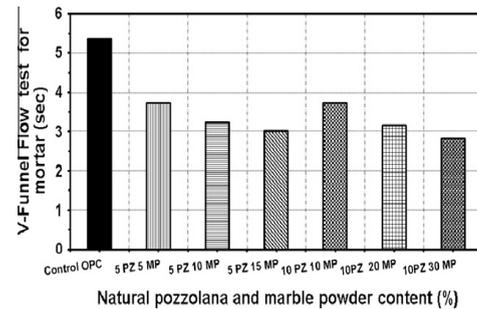


Fig. 10. V-funnel flow time for mortar with ternary cement.

time of concrete containing PZ are shown in Figs. 11 and 12, whereas those for (PZ + MP) are shown in Figs. 13 and 14.

5.2.1. Binary mixtures

It could be seen from Fig. 11 that up to 15% PZ, there was no effect on the slump flow as compared to control concrete. However, at 20% and 25% PZ, slump flow of concrete reduced to 342 mm and 269 mm, respectively; a reduction of 55% and 65%. Slump flow diameters of concrete mixtures were kept in the range (650–800 mm) suggested by EFNARC [19], except for the mixture with PZ content more than 15% in binary systems and more than 20% in ternary systems. This indicates that PZ remarkably reduced the slump flow diameters of SCC, especially for replacement levels higher than 15%.

As shown in Fig. 12, V-funnel flow time increased with increase in PZ content. The use of PZ appeared to be responsible in the increase of slump flow time. The increase in flow time was 0, 2.4 and 3.7 s for concrete containing 5%, 10% and 15% PZ. There was no flow for 20% and 25% PZ.

The J-Ring diameter was in the range of 650–750 mm for all mixes except those with less than 15% of pozzolana in binary systems. The difference in concrete height inside and outside J-Ring was less than 20 mm for all mixtures.

The results of the L-Box tests showed that all concrete mixtures present L-Box height ratios higher than 80%, but binary systems with more than 20% and 25% of PZ present no flow. This also confirms the results of the slump flow test.

5.2.2. Ternary mixtures

For all mixes with ternary binder, the values of slump flow were in the range (650–800 mm) recommended by EFNARC [19]. Results show that the use of MP in ternary systems improved the workability, (Fig. 13 and 14). The less flowability for SCC with PZ is related to the higher surface area of PZ and hence its higher water

Table 8
Fresh properties of the SCCs.

Mix description	Slump test		L-Box test			V-funnel test (s)	Sieve stability test (%)	J-Ring	
	T500 (s)	D (mm)	T200 (s)	T400 (s)	H ₂ /H ₁ (%)			D (mm)	ΔH (mm)
Control OPC	1.15	760	0.83	0.90	92.78	6.08	8.84	755	8.00
5 PZ	1.39	779	1.34	1.43	80.53	6.10	10.75	697	10.25
10 PZ	0.95	777	0.63	1.31	84.63	8.52	12.34	736.5	14.00
15 PZ	1.82	764.5	1.45	1.63	86.04	9.81	14.71	651.5	18.25
20 PZ	-	342.0	-	-	-	-	0	-	-
25 PZ	-	269.5	-	-	-	-	0	-	-
5 PZ 5 MP	0.67	802	0.72	2.11	84.81	8.04	2.17	717	14.00
5 PZ 10 MP	0.81	807	0.54	1.30	93.50	5.08	8.99	724.5	9.25
5 PZ 15 MP	0.94	815	0.63	0.78	93.50	4.27	12.06	756	8.50
10 PZ 10 MP	1.30	753	0.85	1.40	88.60	8.07	3.83	689	14.25
10 PZ 20 MP	1.44	788	1.02	1.30	87.65	6.43	4.33	718.5	9.00
10PZ 30 MP	1.97	802.5	0.63	0.77	91.25	5.92	6.787	744	7.53

(-): No flow.

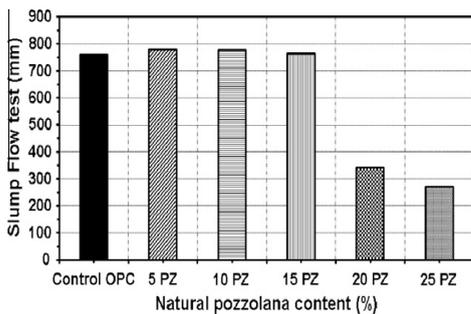


Fig. 11. Slump flow test vs. natural pozzolana content for concrete.

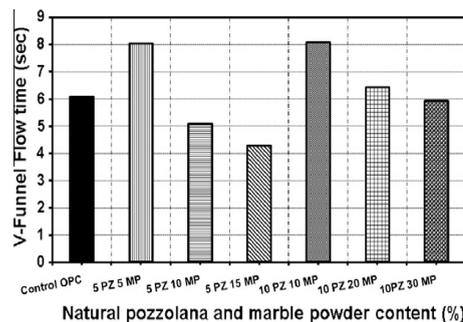


Fig. 14. V-funnel flow time for concrete with ternary cement.

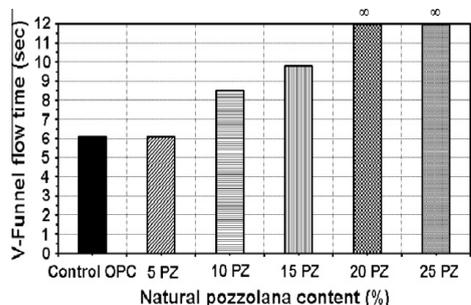


Fig. 12. V-funnel flow time vs. natural pozzolana content for concrete.

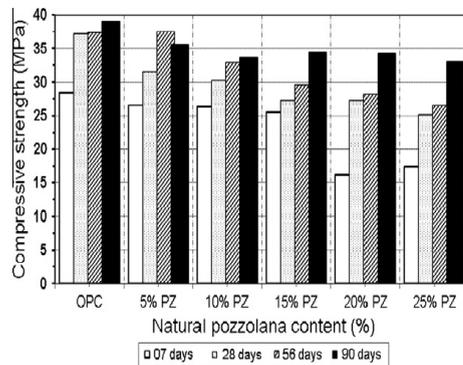


Fig. 15. Compressive strength of binary SCC.

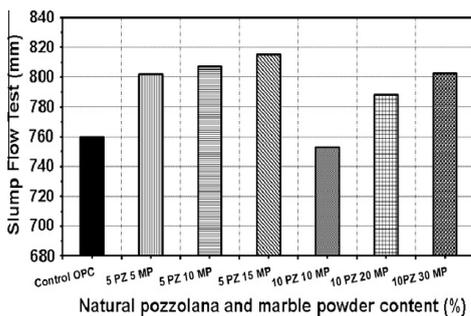


Fig. 13. Slump flow test for concrete with ternary cement.

requirement. The results are in agreement with previous studies on mortar and concrete with slag and metakaolin [24,25].

The addition of MP decreases the V-funnel flow (Fig. 14). The V-funnel flow time was in the range of 4.27–8.07 s (Table 8). Concrete mixtures (5PZ, 10 MP) and (5PZ, 15 MP) gave respectively 5.08 and 4.27 s and hence do not fulfil the (6–12 s) limit.

For binary and ternary system the values of sieve stability test were in the range (0–15%) recommended by EFNARC [19].

5.3. Compressive strength

Compressive strength results of concrete made with PZ are shown in Fig. 15 and that of concrete made with both PZ and MP

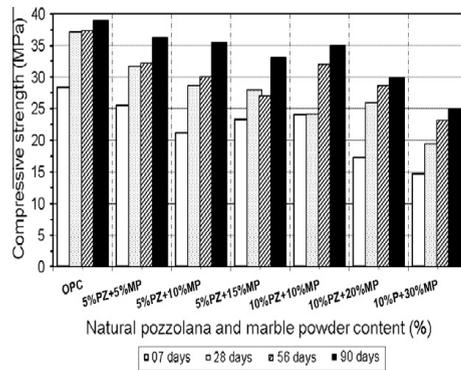


Fig. 16. Compressive strength of ternary SCC.

are shown in Fig. 16. It can be seen from Fig. 15 that strength decreases with the increase in PZ content at all ages. Similarly, for concrete made with (PZ + MP) content, strength decreased at all ages. Apparently, the slower evolution of strength is caused by the presence of PZ in the concrete mixture. Its chemical composition and in particular its high content of SiO₂ made good prerequisites for activity not as filler only but partially as binder due to pozzolanic activity. The same effect on compressive strength has also been observed with slag for SCC [24]. Therefore, the performance of SCC containing both PZ and MP can be considered satisfactory taking into account that the decrease in compressive strength is relatively less important at late ages (56 and 90 days).

6. Conclusion

The main aim of this study is to investigate the effect of PZ and MP on the fresh and hardened properties of SCCs. The Okamura's method, with modifications to meet local materials' requirements, was found suitable to design self-compacting concrete. At a constant water/powder ratio and SP content, the use of both PZ and MP by substitution to cement has no negative effects on the workability of SCC.

In binary systems, an improvement of workability was observed up to 15% of PZ content. In ternary systems, the use of MP content (5–30%) enhances the rheological properties of both mortar and concrete. However, a reduction of compressive strength was observed with PZ and MP addition compared to control concrete. The results indicate that PZ in binary systems increases the

strength at long term (90 days). The maximum strength obtained at 28 days was with 5% of PZ in binary systems and with (5% PZ + 5% MP) in ternary systems.

References

- [1] Zhu W, Bartos PJM. Permeation properties of self-compacting concrete. *Cem Concr Res* 2003;33:921–6.
- [2] Phan TH, Chaouche M, Moranville M. Influence of organic admixtures on the rheological behavior of cement pastes. *Cem Concr Res* 2006;36(10):1807–13.
- [3] Erdoğan TY. Admixtures for concrete. Ankara, Turkey: METU Press; 1997.
- [4] Sonebi M. Medium strength self-compacting concrete containing fly ash: modelling using factorial experimental plans. *Cem Concr Res* 2004;34:1199–208.
- [5] Khayat KH, Bickley J, Lessard M. Performance of self-compacting concrete for casting basement and foundation walls. *ACI Mater J* 2000;97:374–80.
- [6] Park CK, Noh MH, Park TH. Rheological properties of cementitious materials containing mineral admixtures. *Cem Concr Res* 2005;35:842–9.
- [7] Bouzoubaa N, Lachemi M. Self-compacting concrete incorporating high volumes of class F fly ash preliminary results. *Cem Concr Res* 2001;31:413–20.
- [8] Mehta PK. Studies on blended Portland cements containing Santorin earth. *Cem Concr Res* 1981;11(4):507–18.
- [9] Ramezani-pour AA. Engineering properties and morphology of pozzolanic cement-concrete. PhD thesis, University of Leeds; 1987.
- [10] Massazza F. Pozzolanic cements. *Cem Concr Comp* 1993;15(4):185–214.
- [11] Kouloumbi N, Batis G, Pantasopoulou P. Efficiency of natural Greek pozzolan in chloride-induced corrosion of steel reinforcement. *Cem Concr Res* 1995;17(1):18–25.
- [12] Rodríguez-Camacho RE. Using natural pozzolans to improve the sulfate resistance of cement mortars. In: Malhotra VM, editors. International conference, Bangkok, Thailand ACI SP-178; 1998. p. 1021–39.
- [13] Tagnit-Hamou A, Pertove N, Luke K. Properties of concrete containing diatomaceous earth. *ACI Mater J* 2003;100(1):73–8.
- [14] Ghrici M, Kenai S, Said-Mansour M. Mechanical properties and durability of mortar and concrete containing natural pozzolana and limestone blended cements. *Cem Concr Comp* 2007;29:542–9.
- [15] Ghrici M, Kenai S, Meziane E. Mechanical and durability properties of cement mortar with Algerian natural pozzolana. *Mater Sci* 2006;41:6965–72.
- [16] Alyamaç KE, Ince R. A preliminary concrete mix design for SCC with marble powders. *Constr Build Mater* 2009;23:1201–10.
- [17] Güneşli E, Geşoğlu M, Özbay E. Effect of marble powder and slag on the properties of self-compacting mortars. *Mater Struct* 2009;42:813–26.
- [18] Domone PL, Jin J. Properties of mortar for self-compacting concrete. In: Skarendahl A, Petersson O, editors. Proceedings of the 1st international RILEM symposium on self-compacting concrete; 1999. p. 109–20.
- [19] EFNARC. Specification and guidelines for self-compacting concrete. Norfolk (UK), European federation for specialist construction chemicals and concrete systems; 2002 [English ed.].
- [20] Okamura H, Ozawa K. Mix-design for self-compacting concrete. *Concr Libr JSCE* 1995;25:107–20.
- [21] Okamura H, Maekawa K, Ozawa K. High performance concrete. 1st ed. Tokyo: Gihoudou Pub.; 1993.
- [22] EFNARC. European guidelines for self-compacting concrete: specification, production and use. Self-compacting concrete European project group; 2005.
- [23] Chai H-W. Design and testing of self-compacting concrete. PhD thesis, University of London; 1998.
- [24] Boukendakdji O, Kenai S, Kadri E, Rouis F. Effect of slag on the rheology of fresh self-compacted concrete. *Constr Build Mater* 2009;23:2593–8.
- [25] Said-Mansour M, Kadri E-H, Kenai S, Ghrici M, Bennaceur R. Influence of calcined kaolin on mortar properties. *Constr Build Mater* 2011;25:2275–82.

ANNEXE E

NOMENCLATURE

A	Additions
A_b	coefficient d'absorption
B_j	Différence d'hauteur
BAP	Béton autoplaçant
BHP	Béton à haute performance
BO	Béton Ordinaire
BPE	Béton prêt à l'emploi
BV	Béton vibré
C	Ciment
CEM I 42.5	Ciment Portland ordinaire de Classe 42,5
CV	cendres volantes
$\text{Ca}(\text{OH})_2$	Chaux hydratée
CaCO_3	Carbonate de calcium
C – S – H	Silicate de calcium hydraté
D_{max}	Diamètre max des granulats
E/C	rapport Eau sur Ciment
E/L	rapport Eau sur Liant
E_t	Étalement de galette du mortier ou béton
FS	Fumée de silice
G/S	rapport Gravier sur sable
L	Laitier
MAP	Mortier autoplaçant
MP	Poudre de marbre
OPC	Ciment Portland ordinaire
PC	Superplastifiant à base de polycarboxylates
PNS	Superplastifiant à base de naphthalène sulfonate
PZ	Pouzzolane naturelle
S/M	rapport Sable sur mortier
SCC	Self compacting concrete
SP	Superplastifiant
Sp/L	rapport Superplastifiant sur Liant
T_{200}	Temps d'écoulement pour que le diamètre d'étalement atteigne une valeur de 20 cm, (sec).
T_{400}	Temps d'écoulement pour que le diamètre d'étalement atteigne une valeur de 40 cm, (sec).
T_{500}	Temps d'écoulement pour que le diamètre d'étalement atteigne une valeur de 50 cm, (sec).

T_v	Temps d'écoulement par V-funnel
μ	Viscosité
ω	La teneur en eau
II	Pourcentage de laitance
τ_0	Seuil de cisaillement

RÉFÉRENCES

- [1] Okamura H. and Ozawa K. «Fine mortar rheology in mix design of self compacting concrete». *Concrete Library of JSCE*, No. 25 :107–120, (June 1995).
- [2] Erdogan T.Y. «Admixtures for concrete». *METU Press*, (1997).
- [3] Sonebi M. «Medium strength self-compacting concrete containing fly ash : modelling using factorial experimental plans». *Cement and Concrete Research*, No. 34 :199–208, (2004).
- [4] Khayat K.H., Bickley J., and Lessard M. «Performance of self-compacting concrete for casting basement and foundation walls». *American Concrete Institute*, No. 97 :374–380, (2000).
- [5] Park C.K., Noh M.H., and Park T.H. «Rheological properties of cementitious materials containing mineral admixtures». *Cement and Concrete Research*, No. 35 :842–849, (2005).
- [6] Bouzoubaa N. and Lachemi M. «Self-compacting concrete incorporating high volumes of class F fly ash preliminary results». *Cement and Concrete Research*, No. 31 :413–420, (2001).
- [7] Mehta P.K. «Studies on blended Portland cements containing Santorin earth». *Cement and Concrete Research*, No. 11(4) :507–518, (1981).
- [8] Ramezani pour A.A. *Engineering properties and morphology of pozzolanic cement-concrete*. PhD thesis, University of Leeds, 1987.
- [9] Massazza F. «Pozzolanic cements». *Cement and Concrete Composite*, No. 15(4) :185–214, (1993).
- [10] Kouloumbi N., Batis G., and Pantasopoulou P. «Efficiency of natural Greek pozzolan in chloride-induced corrosion of steel reinforcement». *Cement and Concrete aggregate*, No. 17(1) :18–25, (1995).
- [11] Rodriguez-Camacho R.E. «Using natural pozzolans to improve the sulfate resistance of cement mortars». *American Concrete Institute*, SP-178 :1021–1039, (1998). Bangkok, Thailand.
- [12] Tagnit-Hamou A., Pertove N., and Luke K. «Properties of concrete containing diatomaceous earth». *American Concrete Institute*, No. 100(1) :73–78, (2003).

- [13] Ghrici M., Kenai S., and Said-Mansour M. «Mechanical properties and durability of mortar and concrete containing natural pozzolana and limestone blended cements». *Cement and Concrete Composite*, No. 29 :542–549, (2007).
- [14] Ghrici M., Kenai S., and E. Meziane. «Mechanical and durability properties of cement mortar with Algerian natural pozzolana». *Materials Sciences*, No. 41 :6965–6972, (2006).
- [15] Alyamaç K.E. and Ince R. «A preliminary concrete mix design for SCC with marble powders». *Construction and Building Materials*, No. 23 :1201–1210, (2009).
- [16] Güneyisi E., Gesoglu M., and Ozbay E. «Effect of marble powder and slag on the properties of self-compacting mortars». *Materials and Structure*, No. 42 :813–826, (2009).
- [17] Güneyisi E., Gesoglu M., and Ozbay E. «Utilization of waste marble dust as an additive in cement production». *Materials and Design*, No. 31 :4039–4042, (2010).
- [18] Sedran T. «Les Bétons Autonivelants». *bulletin LCPC 196*, réf. 3889 :53–60, (mars-avril 1995).
- [19] Okamura H. and Ouchi M. «Self-compacting concrete. Development, present and future». *Proceedings of First International RILEM Symposium on Self-Compacting Concrete PRO 7*, :3–14, (13-15 septembre 1999). Stockholm, Suède.
- [20] Billberg P. «Influence of filler characteristics on SCC rheology and early hydration». *Proceedings of 2nd International Symposium on Self-Compacting Concrete*, :285–294, (23-25 octobre 2001). Tokyo, Japon.
- [21] Baron J. and Ollivier J.P. «Les bétons Bases et données pour leur formulation». *Editions Eyrolles*, (1996).
- [22] Tangtermsirikuls S., Sakamoto J., Shindoh T., and Matsuoka Y.H. «Evaluation of resistance to segregation of super workable concrete and role of a new type of viscosity agent». *Taisei Technical Research Report*, :369–376, (1995).
- [23] Jacobs F. and Hunkeler F. «Design of self-compacting concrete for durable concrete structures». *Proceedings of First International RILEM Symposium on Self-Compacting Concrete PRO 7*, :397–407, (13-15 septembre 1999). Stockholm, Suède.
- [24] Boukendakdji O. *Etude de l'influence des paramètres de formulation sur les propriétés d'un béton autoplaçant : Optimisation des conditions opératoires*. PhD thesis, Université Saâd Dahleb de Blida, 2010. 182 pages.

- [25] Li Z. and Ding Z. «Property improvement of Portland cement by incorporating with metakaolin and slag». *Cement and Concrete Research*, 33 :579–584, (2003).
- [26] Necira B., Guettala A., and Chabi S. «Formulation des bétons autoplaçants : Effet des ajouts minéraux et des adjuvants». *ciences Technologies et Développement ANDRU*, 2 :66–79, (2007).
- [27] Husson S. «*Etude physico-chimique et mécanique des interactions ciment-fillers. Application aux mortier*». PhD thesis, ENSM Saint-Etienne et INP Grenoble, mars, (1991). 166p.
- [28] Chloup-Bondant M. «*Etude des mécanismes réactionnels dans l'hydratations des silicates et aluminates tricalciques en présence d'un filler calcaire*». PhD thesis, Université de Henri Poincaré, Nancy I, Juin, (1996). 156p.
- [29] Soroka I. and Stern N. «Calcareous fillers and the compressive strength of portland cement». *Cement and Concrete Research*, 6(3) :367–376, (1976).
- [30] Heikal M., EL-Didamony H., and Morsy M.S. «Limestone-filled pozzolanic cement». *Cement and Concrete Research*, 30(11) :1827–1834, (2000).
- [31] Ghezal A. «Modélisation Statique du Comportement des BAP et Optimisation». Master's thesis, Université de Sherbrooke, (1999).
- [32] Menai K. «Etude de l'Effet d'Ajouts Chimiques et Minéraux sur la Maniabilité, la Stabilité et les Performances des Bétons Autonivelants». Master's thesis, Université de Sherbrooke, 1995.
- [33] Güneyisi E. and Gesoglu M. «Properties of self-compacting portland pozzolana and limestone blended cement concretes containing different replacement levels of slag». *Materials and Structure*, 44 :1399–1410, (2011).
- [34] Khelafi H. and Kerdal D. «Etude expérimentale sur le comportement mécanique des mortiers contenant des fillers pouzzolaniques». In *Proceeding du séminaire international sur la qualité du béton en climat chaud*, pages 313–321, 22-24 Mars (1994). Ghardaia.
- [35] Belas Blearibi N., Semcha M., and Laoufi L. «Influence de la pouzzolane de Béni-Saf sur les caractéristiques mécanique des bétons». *Canadian journal of civil engineering*, 30 :580–584, (2003).
- [36] Belhachemi B. «Influence de la surface spécifique Blaine sur la résistance d'un ciment pouzzolanique». In *Colloque CMEDIMAT*, 6-7 décembre (2005). 8p.

- [37] Boudchicha A., Gallias J.L., and Mezghiche B. «Utilisation d'une nouvelle approche méthodologique pour l'évaluation de l'effet des additions minérales sur les propriétés des mélange cimentaire». In *Colloque CMEDIMAT*, 6-7 décembre (2005). 8p.
- [38] Isaia G.C., Gastaldini A.L.G, and Moraes R. «Physical and pozzulanic action of mineral additions on the mechanical strength of high-peformance concrete». *Cement and Concrete Composite*, 25(1) :69–76, (2003).
- [39] Okamura H., Ozawa K., and Ouchi M. «Self-Compacting Concrete». *Structural Concrete*, Journal of the fib Vol. 1, No. 1 :3–17, (2000).
- [40] AFGC. «Bétons autoplaçants - Recommandations provisoires». *Annales du bâtiment et des travaux publics*, (juin 2000). 63 p.
- [41] RILEM. «Self-Compacting Concrete. State-of-the-art». (2001). France.
- [42] EFNARC. «Specification and guidelines for self-compacting concrete». *European federation for specialist construction chemicals and concrete systems*, (2002). Norfolk (UK).
- [43] Bartos P.J.M. «Assessment of properties of underwater concrete by the Orimet test». *Proceedings of the International RILEM workshop on Special Concretes Workability and Mixing*, :191–200, (1993). Paisley, Ecosse.
- [44] RILEM. «Mix Design». *Proceedings of First International RILEM Symposium on Self-Compacting Concrete PRO 7*, (13-15 septembre 1999). Stockholm, Suède.
- [45] Hayakawa M., Matsuoka Y., and Yokota K. «Application of super workable concrete in the construction of 70-story building in Japan». *Second CANMET/ACI on advances in concrete technology*, ACI 154-20 :381–397, (1995). Las Vegas.
- [46] Nagataki S. and Fujiwara H. «Self-compacting property of highly flowable concrete». *Second CANMET/ACI on advances in concrete technology*, ACI 154-20 :301–314, (1995). Las Vegas.
- [47] Petersson O., Billberg P., and Van B.K. «A model for Self-Compacting Concrete». *International Rilem Conference on Production methods and workability of concrete*, 32, (1999). RILEM Proceedings.
- [48] Okamura H., Ozawa K., and Maekawa K. «Concrete with High Filling Capacity - Development of High Performance Concrete». *The Third East Asia-Pacific Conference on Structural Engineering and Construction*, 32 :299–304, (23-26 April, 1991). Shanghai.
- [49] Ouchi M. and Edamatsu Y. «A rational mix-design method for selfcompacting concrete considering interaction between coarse and mortar particles». *Proceedings*

- of First International RILEM Symposium on Self-Compacting Concrete PRO 7*, :397–407, (13-15 septembre, 1999). Stockholm, Suède.
- [50] Oh S.G., Nogushi T., and Tomosawa F. «Toward mix design for rheology of self-compacting concrete». *In Proceedings of the First International RILEM Symposium of Self-Compacting Concrete*, RILEM, (1999).
- [51] Bui V.K. and Montgomery D. «Mixture porportioning method for self-compacting high performance concrete with minimum paste volume». *In Proceedings of the First International RILEM Symposium of Self-Compacting Concrete*, RILEM, (1999).
- [52] Tangtermsirikul S. and Van B.K. «Blocking criteria for aggregate phase of self-compacting high performance concrete». *In Proceedings of regional symposium on infrastructure development in civil engineering*, SC-4, (19-20 décembre, 1995).
- [53] Turcry P. «*Retrait et Fissuration des Bétons Autoplaçants Influence de la Formulation*». PhD thesis, l'Ecole Centrale de Nantes et l'Université de Nantes, 3 février (2004).
- [54] Sedran T. «*Rhéologie et rhéométrie des bétons. Application aux bétons autonivellants*». PhD thesis, Ecole Nationale des Ponts et Chaussées, 1999.
- [55] Sedran T. and De Larrard F. «Manuel d'utilisation de RENE-LCPC, Logiciel d'optimisation granulaire version 6.1d». LCPC, (2000).
- [56] Paultre P., Khayat K.H., Cusson D., and Tremblay S. «Structural Performance of Self-Consolidating Concrete Used in Confined Concrete Columns». *American Concrete Institute*, 102(4) :560–568, (2005).
- [57] Gibbs J.C. and Zhu W. «Strength of hardened self-compacting concrete». *Proceedings of First International RILEM Symposium on Self-Compacting Concrete PRO 7*, :199–209, (2005). Stockholm, Suède.
- [58] Sonebi M. and Bartos P.J.M. «Hardened SCC and its bond with reinforcement». *Proceedings of First International RILEM Symposium on Self-Compacting Concrete PRO 7*, :275–289, (2005). Stockholm, Suède.
- [59] Fukute T., Moriwake A., Sano K., and Hamasaki K. «Development of super workable concrete for multi-functional port structures». *Proceedings of the 2nd International Symposium of CANMET/ACI*, ACI SP 154 :335–356, (1995). Las Vegas, Nevada.
- [60] Ambroise J., Péra J., and Rols S. «Les bétons autonivellants». *Annales du Bâtiment et des Travaux Publics*, No. 1 :37–41, (1997).

- [61] Khayat K.H. and Yahia A. «Effect of Welan Gum-High Range Water Reducer Combinations on rheology of Cement Grout». *American Concrete Institute*, vol. 94, n°5 :365–372, (Septembre, 1997).
- [62] Sonebi M., Bartos P.J.M., and Tamimi A.K. «Flexural Response and Performance of Reinforced Beams Cast with Self-Compacting Concrete». *Proceedings of the 2nd International Symposium on Self-Compacting Concrete Edition Ozawa K. and Ouchi M.*, :517–526, (October, 2001). Tokyo, Japan.
- [63] Persson B. «A comparison between mechanical properties of self-compacting concrete and the corresponding properties of normal concrete». *Cement and Concrete Research*, 31 :193198, (2001).
- [64] Assié S. «Durabilité des bétons autoplaçants». PhD thesis, Institut National des Sciences Appliquées de Toulouse, 29 Octobre 2004.
- [65] Aïtcin P. and Irassar E.F. «L’interaction ciment/superplastifiant. Cas des polysulfonates.». *Bulletin des laboratoires des Ponts et Chaussées*, 233 :87–98, (Juillet-Août, 2002).
- [66] Holschemacher K. «Hardened material properties of self-compacting concrete». *Journal of civil engineering and management*, 10(4) :261–266, (2004).
- [67] Felekoglu B., Turkel S., and Baradan B. «Effect of water/cement ratio on the fresh and hardened properties of self-compacting concrete.». *Building and Environment*, 42 :17951802, (2007). North Western University, Chicago.
- [68] Domone P.L. «A review of the hardened mechanical properties of self-compacting concrete.». *Cement and Concrete Research*, 29(1) :1–12, (2007).
- [69] Pons G., Proust E., and Assie S. «Creep and shrinkage of self-compacting concrete : a different behaviour compared with vibrated concrete». *Proceedings of 3rd International RILEM Symposium on Self-Compacting Concrete PRO 33*, :645–645, (17-20 août 2003). Reykjavik, Iceland.
- [70] Hu C. and Barbieri B. «Comparaison des retraits des bétons autonivelants et d’un béton fluide traditionnel». *Science des matériaux et propriétés des bétons, 1ère Rencontre Internationale*, :265–272, (5-6 mars 1998). Toulouse, France.
- [71] Ogawa A., Sakata K., and Tanaka S. «A study on reducing shrinkage of high-flowable concrete». *Proceedings of the 2nd International Symposium of CANMET/ACI*, :55–72, (1995). Las Vegas, Nevada.
- [72] S. Rols, Ambroise J., and et Pera J. «Development of an admixture for self-leveling concrete». *Proceedings of the 5th CANMET/ACI International Conference On*

- Superplastifiant and Other Chemical Admixtures in Concrete Sous la direction de V.M. Malhotra*, :493–509, (1997). Rome.
- [73] Tanaka K., Sato K., Watanabe S., Arina I., and Suenaga K. «Development and utilization of high performance concrete for the construction of the Akashi Kaikyo Bridge». *Proceedings of the International Symposium on High Performance Concrete in Severe Environments*, ACI-SP140 :25–51, (1993). Detroit.
- [74] Hayakawa M., Matsuoka Y., and Shindoh T. «Development and application of super workable concrete». *RILEM International Workshop on Special Concretes : Workability and Mixing*, (1993).
- [75] Kuroiwa S. «Application of Super Workable Concrete to Construction of a 20-Story Building». *High-Performance Concrete in Severe Environments ACI P. Zia, edition*, SP 140 :174–161, (1993). Farmington, Hills, Mich.
- [76] Benkechkache G. and Houari H. «Comparaison des retraits et fluages des bétons autoplaçants et des bétons ordinaires vibres». *Sciences and Technologie*, B-No. 30 :9–16, (octobre, 2009).
- [77] Proust E. «Retraits et fluages des bétons autoplaçants : vers une meilleure compréhension des comportements différés». PhD thesis, INSA de Toulouse, 2002.
- [78] Acker P. «Les origines du retrait et du fluage du béton». *Revue française de génie civil*, 7 :761–776, (2003).
- [79] Zhu W., Quinn J., and Bartos P.J.M. «Transport properties and durability of self-compacting concrete». *Proceedings of 2nd International Symposium on Self-Compacting Concrete*, :451–458, (23-25 October 2001). Tokyo, Japan.
- [80] Zhu W. and Bartos P.J.M. «Permeation properties of self-compacting concrete». *Cement and Concrete Research*, 33 :921–926, (2003).
- [81] Tang L., Andalen A., Johansson J.O., and Hjelm S. «Chloride diffusivity of self-compacting concrete». *Proceeding of First International RILEM Symposium on Self-Compacting Concrete PRO 7*, :187–198, (13-15 September 1999). Stockholm, Suède.
- [82] Rougeau P., Maillard J.L., and Mary-Dippe C. «Comparative Study on properties of self-compacting concrete and high performance concrete used in precast construction». *Proceeding of First International RILEM Symposium on Self-Compacting Concrete PRO 7*, :251–261, (13-15 September 1999). Stockholm, Suède.

- [83] Audenaert K. and De Shutter G. «Chloride penetration in self compacting concrete». *Proceeding of 3rd International RILEM Symposium on Self-Compacting Concrete PRO 33*, :818–825, (17-20 August, 2003). Reykjavik, Iceland.
- [84] Aitcin P. C., Neuville A., and Acker P. «Les différents types de retrait du béton». *Bulletin du LCPC 215*, réf. 4184 :41–51, (mai-juin 1998).
- [85] Audenaert K. and De Shutter G. «Influence of moisture on the carbonation of self-compacting concrete». *Proceeding (SP 212) of the Dixth CANMET/ACI International Conference on Durability of Concrete*, :451–465, (juin 2003). Greece.
- [86] Khelifa M.R. «Effet de l'attaque sulfatique externe sur la durabilité des bétons autoplaçants». PhD thesis, Université D'Orléans et Université de Constantine, Juin, 2009.
- [87] Brunetaud X. «Etude de l'influence de différents paramètres et de leurs interactions sur la cinétique et l'amplitude de la réaction sulfatique interne au béton». PhD thesis, Ecole Centrale des Arts et Manufactures - Ecole Centrale de Paris, 08 Décembre 2005.
- [88] Pavoine A. «Evaluation du potentiel de réactivité des bétons vis-à-vis de la formation différée de l'ettringite». PhD thesis, Université Pierre et Marie Curie - Paris VI, 2003.
- [89] Mehta P.K. «Concrete : structure, properties and materials». *Prentice-Hall*, :105–169, (1986).
- [90] Planel D. «Les effets couplés de la précipitation d'espèces secondaires sur le comportement mécanique et la dégradation chimique des bétons». PhD thesis, Université de Marne La vallée, UFR des Sciences et Technologies, 04 Juin 2002.
- [91] Skalny J. and Pierce J.S. «Sulphate attack issues». *Seminar on sulphate mechanisms*, (October 5 and 6 1998). Quebec City, Quebec, Canada.
- [92] Aïtcin P.C. «Autogenous shrinkage measurement». *Proceedings of Autogenous shrinkage of concrete*, :257–268, (1998). Hiroshima.
- [93] Neville A.M. «Propriétés des Bétons, traduction CRIB». *édition Paris Eyrolles*, :257–268, (2000). Sherbrooke, Canada.
- [94] Chaussadent T. and Dron R. «La carbonatation du béton : diagramme des équilibres entre phases». *Rapport Service Physico-chimie des matériaux LCPC*, (1996).
- [95] Bouhamou N., Belas N., Mebrouki A., Mesbah H., and Ammar Y. «Etude de l'influence des paramètres de composition sur le comportement à l'état frais du béton autoplaçant à base de matériaux locaux». *Sciences Technologies et Développement, ANDRU*, No. 2 :31–49, (2007).

- [96] Jin J. and Domone P.L. «Relationships between the fresh properties of SCC and its mortar component». *Proceedings of the first North American Conference on the design and use of Self-Consolidating Concrete, Centre for Advanced Cement Based Materials*, :33–38, (November 2002). North Western University, Chicago.
- [97] Domone P.L.J. and Jin J. «Properties of mortar for Self-Compacting Concrete». *Proceeding of First International RILEM Symposium on Self-Compacting Concrete PRO 7*, :109–120, (13-15 September 1999). Stockholm, Suède.
- [98] Aiad I., Abd El-Aleem S., and El-Didamony H. «Effect of delaying addition of some concrete admixtures on the rheological properties of cement pastes». *Cement and Concrete Research*, 32 :1839-1843, (2002).
- [99] Takada K., Pelova G. I., and Walraven J.C. «Influence of Mixing Efficiency on the Fresh Properties of Self-Compacting Concrete». *Proceedings of the second International Symposium on Self Compacting Concrete*, March 1999. Kochi.
- [100] Takada K. and Walraven J.C. «Influence of mixing efficiency on the properties of flowable cement pastes». *Proceedings of the second International Symposium on Self Compacting Concrete*, :545–554, (2001). Japan.
- [101] De Larrard F., Cazacliu B., Chopin D., and Château E. «Production of SCC». *Proceeding of 3rd International RILEM Symposium on Self-Compacting Concrete PRO 33*, :481–494, (17-20 August, 2003). Reykjavik, Iceland.
- [102] Chai H. *Design and testing of SCC*. PhD thesis, University College of London (UCL), April 1998. 259 pages.
- [103] Sonebi M. and Bartos P.J.M. «Filling ability and plastic settlement of selfcompacting concrete». *Materials and Structures*, 35 :462–469, (2002).
- [104] EFNARC. «The European guidelines for self compacting concrete». *European federation for specialist construction chemicals and concrete systems*, (2005). www.efnarc.org, 68p.
- [105] NF EN 196-9. «Norme européenne; Méthode d’essais des ciment : chaleur d’hydratation-méthode semi-adiabatique». *AFNOR*, Décembre, (2010).
- [106] Billberg P. «Mix Design for self-compacting concrete». *Proceedings of the first international RILEM Symposium on Self-Compacting Concrete*, :47–58, (1999). Cachan cedex.
- [107] Nehdi M. and Rahman M. «Why some carbonate fillers cause rapid increase of viscosity in dispersed cement-based materials». *Cement and Concrete Research*, 30(10) :1663–1669, (2000).

- [108] Ghezal A. and Khayat K.H. «Optimizing self-consolidating concrete with limestone filler by using statistical factorial design methods». *American Concrete Institute*, 3 :264–272, (1999).
- [109] Esping O. «Effect of limestone filler BET(H_2O)-area on the fresh and hardened properties of self-compacting concrete». *Cement and Concrete Research*, 38 :938–944, (2008).
- [110] Ye G., Liu X., De Schutter G., Poppe A-M, and Taerwe L. «Influence of limestone powder used filler in SCC on hydration and microstructure of cement pastes». *Cement and Concrete Composite*, 29 :94–102, (2007).
- [111] Nanthagopalan P. and Santhanam M. «Experimental investigations on the influence of paste composition and content on the properties of self-compacting concrete?». *Construction and Building Materials*, 23 :3443–3449, (2009).
- [112] Gram H.E. and Piiparrinen P. «Properties of SCC Especially early and long term shrinkage and salt frost resistance». *Proceedings of the first international RILEM Symposium on Self-Compacting Concrete*, :211–225, (1999). Cachan cedex.
- [113] Westerholm M., Lagerblad B., Silfwerbrand J., and Forssberg E. «Influence of fine aggregate characteristics on the rheological properties of mortars». *Cement and Concrete Composite*, 30 :274–282, (2008).
- [114] Fang W., Jianxiong C., and Changhui Y. «Studies on Self-Compacting High Performance Concrete with high volume mineral additives». *Proceeding of First International RILEM Symposium on Self-Compacting Concrete PRO 7*, :569–578, (13-15 September 1999). Stockholm, Suède.
- [115] Spengler A. and Schiessl P. «Sand-rich Self Compacting Concrete». :387–392, (October, 2001). Tokyo, Japan.
- [116] Flatt R.J. and Houst Y.F. «A simplified view on chemical effects perturbing the action of superplasticizers». *Cement and Concrete Research*, 31 :1169–1176, (2001).
- [117] Güneyisi E. and Gesoglu M. «Properties of self-compacting portland pozzolana and limestone blended cement concretes containing different replacement levels of slag». *Materials and Structures*, 44 :1399–1410, (2011).
- [118] Borsoi A., Collepardi M., Collepardi S., Troli R., and Zanardi L. «Low-Heat, High-Strength, Durable Self-Consolidating Concretes». *9th CANMET/ACI International Conference on recent Advances in Concrete Technology*, 44 :1399–409, (2007). Warsaw, Poland.

- [119] Wüstholtz T. «A model approach to describe the fresh properties of self-compacting concrete (SCC)». *Otto-Graf Journal*, 16, (2005).
- [120] Safawi M.I., Iwaki I., and Miura T. «A study on the applicability of vibration in fresh high fluidity concrete». *Cement and Concrete Research*, 35 :1834–1845, (2005).
- [121] ASTM C 618-03. «Standard specification for coal fly ash and raw or calcined natural pozzolan for use in concrete». (February, 2003). 3 pages.
- [122] Paine K.A., Dhir OBE R.K., and Zheng L. «Predicting early-age temperatures of blended-cement concrete». *Proceedings of the Institution of Civil Engineers Construction Materials*, 159-CM4 :163–170, (Novembre 2006).
- [123] Kadri E.H., Kenai S., Ezziane K., Siddique R., and De Shutter G. «Influence of metakaolin and silica fume on the heat of hydration and compressive strength development of mortar». *Applied Clay Science*, 53 :704–708, (2011).
- [124] Kadri E.H., Duval R., Aggoun S., and Kenai S. «Silica Fume effect on hydration heat and compressive strength of high-performance concrete». *American Concrete Institute*, 106-M13 :107–113, (2009).
- [125] Stark J. and Bollman K. «Delayed ettringite formation in concrete». *ZKG international*, 53 :232–240, (2000).
- [126] Kadri E.H. and Duval R. «Hydration heat kinetics of concrete with silica fume». *Construction and Building Materials*, 23 :3388–3392, (2009).
- [127] Kaid N., Cyr M., Julien S., and Khelafi H. «Durability of concrete containing a natural pozzolan as defined by a performance-based approach». *Construction and Building Materials*, 23 :3457–3467, (2009).
- [128] **Belaidi A.S.E**, Azzouz L., Kadri E.H., and Kenai S. «Effect on natural pozzolana and marble powder on the properties of self-compacting concrete». *Construction and Building Materials*, 31 :251–257, (2012).
- [129] Samet B. and Chaabani M. «Characterization of the Tunisien blast-furnance slag and its applications in the formulation of cement». *Cement and Concrete Research*, 35 :1153–1159, (2004).
- [130] Toutanji H., Delatte N., Aggoun S., Duval R., and Danson A. «Effect of supplementary cementitious materials on the compressive strength and durability of short term cured concrete». *Cement and Concrete Research*, 34 :311–319, (2004).
- [131] Rapport. «Hangar de Stockage Sidi Khelifa. Coopérative de céréales et légumes secs». *Laboratoire des Travaux Publics de l'Est LTP Est*, (2004). Constantine, Algérie.

- [132] Rapport. «Pont sur Oued Djeddi. Wilaya de Biskra». *Laboratoire des Travaux Publics de l'Est LTP Est*, (2004). Constantine, Algérie.
- [133] Rapport. «Station de traitement des eaux de Ain-Tinn. Wilaya de Mila». *Laboratoire des Travaux Publics de l'Est LTP Est*, (2006). Constantine, Algérie.
- [134] Rapport préliminaire. «Glissement CW134 - Wilaya de Mila». *Laboratoire des Travaux Publics de l'Est LTP Est*, (2006). Constantine, Algérie.
- [135] Rapport du Laboratoire National de l'Habitat et de la Construction. «Société de Gestion des Participations». *Etudes et Engineering, Unité de Batna*, (Avril, 2006). Algérie.
- [136] Gonzalez M.A. and Irassar E.F. «Effect of Limestone filler on the sulfate resistance of low C₃A Portland cement». *Cement and Concrete Research*, 28(11) :1655–1667, (1998).
- [137] Kaid N., Cyr M., Khelafi H., and Goufi N. «Caractéristiques mécaniques de bétons contenant pouzzolane naturelle face aux attaques a l'eau de mer et aux sulfates». *1st International conferences on sustainable built environment infrastructures in developing countries*, :43–50, 12-14 Octobre (2009). ENSET Oran, Algeria.
- [138] Chuhaoui R., Khelafi H., Mouli M., and Senhadji Y. «Effects de la pouzzolane naturelle sur la durabilité des mortiers exposés aux attaques sulfatiques». *1st International conferences on sustainable built environment infrastructures in developing countries*, :85–92, 12-14 Octobre (2009). ENSET Oran, Algeria.
- [139] Boukhelkhal A. «Rhéologie, caractérisation physico-mécanique et durabilité des bétons autoplaçants à base de la poudre de marbre». Master's thesis, Université Ammar Telidji de Laghouat, (2012).
- [140] Makhloufi Z., Kadri E.H., Bouhicha M., and Benaissa A. «Resistance of limestone mortars with quaternary binders to sulfuric acid solution». *Construction and Building Materials*, 26 :497–504, (2011).
- [141] Said mansour M. «Influence du métakaolin sur le comportement rhéologique et mécanique des bétons à hautes performances». PhD thesis, En cotutelle avec Université Sâad Dahleb Blida Algérie et Université Cergy Pontoise France, Décembre, (2010).